

Implementación de un sistema de control para un sistema activo de estabilización de franjas con acceso remoto vía R  NATA

Javier Espitia Gómez

Universidad EAFIT
Escuela de Ciencias y Humanidades
Medellín, Colombia
2013

Implementación de un sistema de control para un sistema activo de estabilización de franjas con acceso remoto vía RENATA

Javier Espitia Gómez

Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Física Aplicada

Asesor:
Ph. D. Luciano Ángel

Universidad EAFIT
Escuela de Ciencias y Humanidades
Medellín, Colombia
2013

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Jurado

Medellín 14 de junio de 2013

A Santi, Javier David y María Claudia

Agradecimientos

En primer lugar agradezco al Creador y Soberano del universo, Jehová. Me has dado las fuerzas, el aire que respiro y el ánimo que muchas veces me hizo falta en este trabajo. Gracias de verdad, gracias por amarme y darme en mi vida mucho más de lo que merezco. Este trabajo sin tu ayuda en todo ámbito hubiera sido imposible, sin tu permiso no se hubiera movido un solo fotón en ninguno de los experimentos que hicimos.

A mi esposa Claudia, mis hijos (a quienes dediqué este trabajo), mi mamá y hermana, muchas gracias, ustedes son un verdadero apoyo. Gracias por permitirme quitarles tanto tiempo que era de ustedes, por tantos ratos bonitos que me tocó perderme, gracias por acompañarme y darme todo su amor.

A mi director Luciano Ángel, porque sus sugerencias e ideas lograron que este trabajo cumpliera a cabalidad con sus objetivos. Gracias por todo el tiempo que dedicó a revisar el manuscrito; gracias a su manera de corregir, aprendí a escribir mejor, muchas gracias profe, gracias por confiar en mí. También agradezco al profesor Daniel Velásquez por toda su ayuda académica y emocional, y el tiempo dedicado a este proyecto; las primeras versiones del software que se diseñó, se programaron enmarcadas en la materia de Métodos Ópticos del cual yo era su único estudiante, todas sus ideas dieron un impulso muy grande al proyecto. Al ingeniero Tomás Olarte por toda su ayuda altruista, por todas las horas que dedicó a realizar configuraciones y programar conmigo en labVIEWTM para lograr darle acceso remoto a esta plataforma.

A la universidad EAFIT, porque el proyecto de investigación en el que se desarrolló este trabajo de grado fue posible gracias a su apoyo económico. A esta universidad es imposible no quererla, es la mejor empresa para la que he trabajado y la mejor universidad en la que he estudiado. Con solo unos meses de estar en ella, todo el que conozco ya le tiene un gran sentido de pertenencia, sin duda todo el apoyo, incluida la beca que recibí en la segunda mitad de la maestría, y algunas otras cosas, hacen que aquí se estudie y trabaje con más ganas.

A mis profesores de la maestría, Álvaro, Jose Ignacio, Mario Elkin, Jorge David, Mauricio, Claudia y Olga Lucía. La formación que recibí de ustedes y el trabajo ejemplar que noto realizan es una motivación fuerte para trabajar duro y hacer las cosas bien.

Finalmente, a mis compañeros de maestría Carlos, Yudy, Victor y Augusto, que chévere fue estudiar con ustedes, ojalá no perdamos nunca el contacto. Y a mis compañeros de laboratorio, Leidy Marcela, Natalith, Daniel Gómez, Daniel Sierra, Natalia y al doctor René, con ustedes paso más tiempo que con cualquier otra persona y ustedes hacen que trabajar en el 22 sea agradable e incluso divertido, ojalá sigamos cada vez más motivados a fortalecer este maravilloso grupo de Óptica Aplicada.

Resumen

Se presenta a continuación el diseño e implementación de un sistema activo de estabilización de franjas interferométricas con acceso remoto vía la red RENATA. Se instrumentó un interferómetro Mach-Zehnder con un actuador piezoeléctrico en un brazo para introducir diferencias de fase en el patrón, y en el otro brazo otro actuador para compensarlas por medio de un controlador proporcional. Se diseñó en labVIEWTM una plataforma para el usuario que permite escoger los parámetros de la perturbación, visualiza la posición del patrón en tiempo real y además permite evaluar la capacidad del sistema para compensar diferencias de fase. Finalmente, se puso a disposición de los usuarios remotos un experimento de laboratorio y manual de usuario que permite familiarizarse con la plataforma y evaluar el desempeño del sistema de control.

Palabras clave: Interferómetro, Patrón de franjas, Visibilidad, Setpoint, Variable procesada, Control proporcional, labVIEWTM

Contenido

Agradecimientos	v
Resumen	vi
1. Introducción	1
2. Marco Teórico	4
2.1. Interferencia de dos ondas monocromáticas	4
2.1.1. Visibilidad de las franjas	6
2.1.2. Interferómetro Mach-Zehnder	7
2.2. Sistemas de estabilización de franjas	9
2.3. Sistemas de control	11
2.3.1. Sistemas de control en tiempo continuo y discreto	12
2.3.2. Identificación de sistemas	13
2.3.3. Controladores PID	15
2.4. Plataformas virtuales de experimentación	16
3. Diseño e implementación del sistema	18
3.1. PDS(Product Design Specification)	18
3.1.1. Desempeño	18
3.1.2. Facilidades de manufactura	19
3.1.3. Usuarios y requerimientos de la interface	19
3.1.4. Fiabilidad en las mediciones	20
3.1.5. Tiempo de diseño	20
3.2. Conceptualización del sistema	20
3.3. Características del interferómetro	22
3.4. Componentes optoelectrónicos de sensado y actuación	23
3.5. Implementación del sistema desde el computador	25
3.5.1. Panel Frontal	25
4. Sistema de control	35
4.1. Identificación del sistema	35
4.1.1. Constante proporcional	38

4.2. Algoritmo de control	39
4.2.1. Sincronización	39
4.2.2. Diagrama de bloques	40
4.3. Evaluación de desempeño	43
4.4. Acceso remoto	50
5. Conclusiones	51
6. Bibliografía	54
A. Anexo: Práctica de laboratorio y manual de usuario de la plataforma	57
A.1. Descripción general del interferómetro	57
A.2. ¿Cómo acceder a la plataforma?	58
A.3. Observaciones iniciales	60
A.4. Configuraciones iniciales	61
A.5. Perturbación	63
A.6. Controlador	64
B. Anexo: Especificaciones de los dispositivos empleados	65
B.1. Cámara CCD LC 100 de Thorlabs	65
B.2. Driver de actuadores MDT693A de Thorlabs	66
B.3. Actuador Piezo-Eléctrico PAS005 de Thorlabs	67

Lista de Figuras

2-1. Interferómetro Mach-Zehnder	7
2-2. Patrón de interferencia producido por un Mach-Zehnder	8
2-3. Diagrama de flujo de un modelo general lineal	15
3-1. Diagrama general del sistema implementado	21
3-2. Interferómetro implementado	22
3-3. Cámara lineal CCD	23
3-4. Actuador piezoeléctrico	24
3-5. Panel frontal desplegado por el sistema de control implementado en LabVIEW™	27
3-6. Pestaña de configuración de parámetros	30
3-7. Posiciones de máximos y mínimos	31
3-8. Menú desplegable al hacer clic derecho sobre un control o indicador	32
3-9. Ventana ejemplo que se abre cuando se necesita información sobre algún control o indicador	33
3-10. Sección del código como ejemplo de su documentación	34
4-1. Entrada y salida del sistema	36
4-2. Respuesta del actuador. A la izquierda para todo el viaje, a la derecha para la zona en la que se le exige que se mueva en este proyecto	38
4-3. Estructura general del algoritmo	41
4-4. Posición del patrón (PV) alrededor del setpoint (SP) frente a una perturbación, sin control (de 0 a 0.56 s) y con control (de 0.56 a 1.1 s) para una PVmax con control de ± 2 pixeles	44
4-5. Histogramas de la señal de error sin control (izquierda) y con control (derecha) para una PVmáx con control de ± 2 pixeles	44
4-6. Posición del patrón (PV) alrededor del setpoint (SP) frente a una perturbación, sin control (de 0 a 0.96 s) y con control (de 0.96 en adelante) para una PVmáx con control de ± 1 pixel	45
4-7. Histogramas de la señal de error sin control (izquierda) y con control (derecha) para una PVmáx con control de ± 1 pixel	46
4-8. Señal PV con control (Zoom en la figura 4.6)	46
4-9. Varianza del error para una frecuencia de 2Hz con el controlador apagado . .	47

4-10. En a) Varianza del error y en b) Visibilidad del patrón Vs Amplitud de la señal de perturbación para tres frecuencias distintas	47
4-11. En a) Varianza del error y en b) Visibilidad el patrón Vs Frecuencia de la señal de perturbación para tres amplitudes distintas	48
4-12. Varianza del error Vs el producto de amplitud y frecuencia de la señal de perturbación	49
4-13. Visibilidad del patrón Vs el producto de amplitud y frecuencia de la señal de perturbación	49
A-1. Interferómetro Mach-Zehnder	58
A-2. Interface de usuario de la plataforma	59
A-3. Botones de control de ejecución	60
A-4. Configuraciones de la plataforma	61
A-5. Pestaña de posiciones	62
A-6. Configuración de la perturbación	63
B-1. Cámara LC100	65
B-2. Driver	66
B-3. Actuador PAS005	67

1. Introducción

Desde que Neumann y Rose diseñaron en 1967 el primer sistema de estabilización de franjas para holografía [NEUMMAN, 1967], no han dejado de desarrollarse estos sistemas, buscando por una parte optimizar su desempeño y lograr mayor confiabilidad, y por otra parte, tratando de responder a los requerimientos de una gama de aplicaciones muy diversas. Asimismo, en el camino de estos desarrollos, se han probado múltiples alternativas de diseño e implementación práctica. Por tanto, no existe una solución única o una forma estándar para abordar el diseño e implementación de un sistema de estabilización de franjas, ni puede considerarse un problema cerrado o agotado desde el punto de vista de la instrumentación científica. Antes bien, se encuentran referencias recientes [HEILMANN et. al. 2001, CADENA et. al. 2006, YOUNG 2006] que demuestran el recurso de los grupos de investigación a nuevas estrategias metodológicas y recursos tecnológicos, para la implementación de sistemas adaptados a la solución de nuevos problemas.

Sin embargo, al margen de la diversidad de alternativas de diseño e implementación práctica, hay rasgos genéricos recurrentes en cada una de las propuestas reportadas. En primer lugar, la estabilización de franjas es un problema transversal, de interés no solamente para la óptica y la instrumentación científica, sino también para otras ramas de la ciencia y la ingeniería. En segundo término, cada aproximación convoca un trabajo multidisciplinar, especialmente desde la óptica, la instrumentación, el control, la computación y en algunos casos, como el nuestro, la telemática. Desde esta perspectiva, una motivación fuerte para abordar el problema de la estabilización de franjas es su doble atractivo, por un lado su aplicabilidad en muchos campos, y por otro, su capacidad de convocar múltiples ciencias y disciplinas.

Asimismo, más allá de la especificidad de las distintas soluciones presentadas, hay ciertas características comunes a todos los sistemas de estabilización de franjas, en particular, que siempre recurren a un ciclo de realimentación único sobre un sistema (óptico o de otro tipo), partiendo de una señal tomada desde la salida y procesada con base en una señal de referencia, para actuar sobre una parte o componente del sistema y compensar de algún modo las perturbaciones introducidas. Este esquema básico se repite con múltiples variantes en la instrumentación de las etapas de sensado, procesamiento y retro-acción sobre el sistema principal. Es por ello que el diseño e implementación de un sistema de estabilización de franjas, sin importar sus rasgos particulares, se constituye en una estrategia para entender los

fundamentos y abordar los problemas técnicos esenciales involucrados en una gran diversidad de soluciones ligadas a aplicaciones concretas, y acercarse de este modo a la solución de problemas específicos sobre la base de desarrollos complementarios.

El grupo de Óptica Aplicada desde el cual se realizó este proyecto, se ha caracterizado por su capacidad para desarrollar y apropiar diversas técnicas ópticas para el procesamiento de información, con énfasis en la holografía, el speckle, la interferometría, y recientemente, la metrología de vórtices. Ello lo ha llevado a trabajar recurrentemente con esquemas experimentales en los que la luz láser (en el rango visible) se hace interferir para formar patrones de franjas cuya estructura solamente puede apreciarse mediante un microscopio. Por regla general, la información relevante en estos experimentos consiste en un registro de las distribuciones de intensidad asociadas con las franjas de interferencia, para lo cual utilizamos distintos medios (películas holográficas, cristales fotorrefractivos y cámaras CCD). Por tanto, aunque estos registros posteriormente son procesados empleando técnicas análogo-digitales, es un hecho que la calidad de los resultados está determinada por la fidelidad alcanzada en el registro de las franjas, condicionado a su vez por las condiciones de estabilidad bajo las cuales se realiza este proceso.

El propósito de este proyecto fue diseñar e implementar un sistema de control para un sistema activo de estabilización de franjas que opera sobre un interferómetro Mach-Zehnder, que permitiese tanto mejorar la visibilidad de un registro de franjas como evaluar su capacidad para compensar las diferencias de fase producidas por perturbaciones mecánicas externas. La ventaja de un interferómetro de amplitud como el Mach-Zehnder es que en él, los haces se dividen y recorren caminos distintos antes de superponerse nuevamente, y por tanto, las perturbaciones que causan inestabilidad en las franjas pueden introducirse en cualquiera de los haces y compensarse en el otro. Además, en estos interferómetros el sensado de las franjas puede implementarse sobre dos planos distintos, con variaciones mínimas en el montaje. Se propuso diseñar un sistema de estabilización genérico, es decir, no vinculado directamente con una aplicación concreta, pero que permitiese experimentar y valorar el desempeño de las distintas componentes y/o subsistemas (ópticos, opto-electrónicos o electromecánicos), de las interfaces de comunicación (entre el computador y los sensores y actuadores), de los métodos y dispositivos para el procesamiento y amplificación de las señales y de los algoritmos computacionales. Por otra parte, mediante el proyecto se propuso generar los protocolos y dispositivos requeridos para que el sistema de estabilización implementado pudiese ser controlado remotamente a través de la plataforma de laboratorios remotos de EAFIT, conectada a la red RENATA, para que sus principios de operación y desempeño pudiesen ser evaluados por los usuarios de dicha plataforma. Complementariamente se pensó en diseñar de un experimento útil para observar el efecto de la estabilización de franjas y evaluar el desempeño del sistema remotamente.

El hecho de que este sistema de estabilización tenga acceso remoto abre la posibilidad de

que usuarios en diversos lugares del mundo (instituciones de educación, laboratorios o grupos de investigación) puedan familiarizarse con la operación y desempeño del sistema y de esta forma puedan acceder a equipos y experimentos que eventualmente no tengan disponibles. Adicionalmente al interés desde el área de la óptica y la física, este sistema diseñado puede emplearse en el área de control como una herramienta para probar diversos sistemas de control adicionales al que está implementado. Usuarios presenciales o remotos podrán modificar bloques de código para probar nuevas formas de adquirir y procesar datos y plantear soluciones diversas al problema de estabilización de franjas.

La estructura del texto es la siguiente: El capítulo 1 desarrolla el marco teórico y el estado del arte; allí se abordan en primer lugar los conceptos físicos referentes a los registros interferométricos y a los sistemas pasivos y activos de estabilización de franjas, para terminar con los fundamentos de las teorías de control electrónico y laboratorios remotos que se usaron en el diseño del sistema de estabilización. El capítulo 2 se refiere al diseño final y la implementación física del interferómetro, y los dispositivos de sensado y actuación empleados. En el capítulo 3 se presenta el sistema de control, diseñado en labVIEWTM, y se desarrolla el tema de la evaluación de desempeño del sistema de estabilización de franjas. El último capítulo corresponde a las conclusiones del trabajo. En la parte final del manuscrito se incluyen una práctica de laboratorio que puede servir de manual de usuario del sistema diseñado.

2. Marco Teórico

En el presente capítulo se presentan las bases teóricas en las que se fundamentan los procesos y desarrollos ejecutados y logrados en el proyecto. En la sección 2.1 se aborda el tema de la interferencia de dos ondas monocromáticas, en la que se explica la definición de la variable que servirá de rasero para evaluar la capacidad del sistema de control para compensar diferencias de fase, a saber, la visibilidad de un patrón de franjas. En la sección 2.2 se hace un recuento de los sistemas de estabilización que se han diseñado, y las formas como se ha atacado el problema de estabilidad de un patrón de franjas encontrados en bases de datos. Luego en la sección 2.3, se abordan los conceptos de ingeniería de control que se aplicaron tanto en la identificación del sistema como en el diseño del controlador. Finalmente en la sección 2.4 se explica la forma como se ha puesto disponible este sistema en la plataforma de experimentación remota con la que cuenta la universidad EAFIT con acceso desde la red RENATA.

2.1. Interferencia de dos ondas monocromáticas

En esta sección nos referiremos primero, muy brevemente, al fenómeno de interferencia entre dos ondas planas con la misma frecuencia, asimismo a algunas de las características de los sistemas de franjas generados a partir de dicha interferencia; en particular, consideraremos el período y la visibilidad de las franjas. Posteriormente se incluirá la información más relevante para el presente trabajo en relación con la configuración básica del interferómetro Mach-Zehnder (empleado en nuestros desarrollos) y los sistemas de franjas asociados.

Siguiendo a Hecht [HECHT, 1998], la intensidad del campo eléctrico resultante \mathbf{E} , en un punto en el espacio donde dos o más ondas de luz coexisten, obedece al principio de superposición, esto es, el campo resultante es igual a la suma vectorial de las perturbaciones constitutivas individuales. Por lo tanto, brevemente, la interferencia óptica equivale a la interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias componentes.

La perturbación óptica, o campo luminoso \mathbf{E} , varía en el tiempo con frecuencias muy al-

tas, de aproximadamente $4,3 \times 10^{14} Hz$ a $7,5 \times 10^{14} Hz$ de tal forma que el campo real instantáneo resulta ser una cantidad imposible de detectar en la práctica. Por otro lado, la irradiancia I puede medirse directamente utilizando una gran variedad de sensores (por ejemplo fotoceldas, cámaras CCD o CMOS, emulsiones fotográficas o nuestros ojos, entre otros). Por consiguiente, resulta mejor plantear el estudio de la interferencia recurriendo a la irradiancia.

Sean

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_{01} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \epsilon_1) \quad (2-1)$$

y

$$\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_{02} \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \epsilon_2) \quad (2-2)$$

dos ondas planas monocromáticas linealmente polarizadas en la misma dirección, de frecuencia angular ω , y que se superponen en un punto \mathbf{r} y en el instante t . En estas expresiones \mathbf{E}_{0i} son las amplitudes de los campos, \mathbf{k}_i los números de onda y ϵ_i las fases iniciales. La irradiancia en ese punto viene dada por:

$$I = \varepsilon \nu \langle \mathbf{E}^2 \rangle_T \quad (2-3)$$

donde ε es la permitividad eléctrica del medio, ν es la velocidad de fase y el promedio se realiza durante un tiempo lo suficientemente grande en relación con el periodo temporal de la onda. Pero consideraremos solamente las irradiancias relativas dentro del mismo medio, omitiendo las constantes:

$$I = \langle \mathbf{E}^2 \rangle_T \quad (2-4)$$

La irradiancia resultante, producto de la superposición de las dos ondas es:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (2-5)$$

en donde I_1 e I_2 representan las intensidades de las ondas (tomadas por separado) y el término I_{12} , denominado término de interferencia, está dado por:

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2-6)$$

donde δ igual a $(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \epsilon_1 - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \epsilon_2)$ es la diferencia de fase resultante de la combinación de una diferencia de longitud de camino y una diferencia del ángulo de fase inicial.

De esta forma, la irradiancia total es

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2-7)$$

En varios puntos del espacio la irradiancia resultante puede ser mayor, menor o igual a $I_1 + I_2$ dependiendo del valor de $I_1 I_2$, específicamente, dependiendo del valor de δ en el punto que se esté considerado. Un máximo de irradiancia se obtiene cuando $\cos \delta = 1$, de modo que

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2-8)$$

cuando

$$\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots \quad (2-9)$$

En este caso de interferencia constructiva total, el desfase entre las dos ondas es un múltiplo entero de 2π y las perturbaciones están en fase. Cuando $0 < \cos \delta < 1$ las ondas están fuera de fase, $I_1 + I_2 < I < I_{max}$ y el resultado se denomina interferencia constructiva. Con $\delta = \frac{\pi}{2} rad$, $\cos \delta = 0$, las perturbaciones ópticas están desfasadas $\frac{\pi}{2} rad$ e $I = I_1 + I_2$. Para $0 > \cos \delta > -1$ se disponen de las condiciones de interferencia destructiva $I_1 + I_2 > I > I_{min}$. Una irradiancia mínima se produce cuando las ondas están desfasadas πrad , los valles se superponen a las crestas, $\cos \delta = -1$ y

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2-10)$$

Esto se produce cuando $\delta = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi, \dots$ y se denomina interferencia destructiva total.

Otro caso algo especial pero muy importante se da cuando las amplitudes de ambas ondas son iguales, es decir $\mathbf{E}_{01} = \mathbf{E}_{02}$. Puesto que las contribuciones de la irradiancia de ambas fuentes son iguales, sea $I_1 = I_2 = I_0$, la ecuación de irradiancia total ahora queda:

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2-11)$$

De la que se deduce que $I_{min} = 0$ e $I_{max} = 4I_0$. Las zonas claras y oscuras que se verían en la región de interferencia se denominan franjas de interferencia.

2.1.1. Visibilidad de las franjas

La calidad de las franjas producidas por un sistema interferométrico puede describirse cuantitativamente usando la visibilidad v que, formulada inicialmente por Michelson, es proporcionada por:

$$v = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2-12)$$

Aquí I_{max} e I_{min} son las irradiancias correspondientes a un máximo y un mínimo contiguos en el sistema de franjas. Cuando $I_{min} = 0$ se tiene la máxima visibilidad, igual a 1, y mientras

I_{min} crece, el valor de visibilidad va disminuyendo hasta un valor cercano a cero, o cero. El hecho de que $v = 0$ (el peor de los casos) quiere decir que no hay diferencia entre los valores I_{max} e I_{min} , por lo que no se observa ningún patrón de interferencia.

En las aplicaciones interferométricas generalmente se busca generar sistemas de franjas cuya visibilidad sea tan alta como sea posible, dado que de este modo se alcanzan mejores resultados, por ejemplo, en la calidad de la reconstrucción de las imágenes en el caso de la holografía, o en la precisión de mediciones cuando se trata de aplicaciones metrológicas.

2.1.2. Interferómetro Mach-Zehnder

Entre la diversidad de sistemas ópticos que producen interferencia, a continuación nos referimos al interferómetro Mach-Zehnder. Tal como se ilustra en la figura 1.1 este se configura mediante dos divisores de haz y dos espejos. El divisor $C1$ posibilita obtener dos haces que se propagan por los caminos 1 y 2. El haz que viaja por el camino 1 es reflejado por el espejo $E1$ y dirigido hacia el divisor $C2$. Ocurre lo mismo con el haz 2 reflejándose en $E2$, para recombinarse ambos haces a la salida de $C2$.

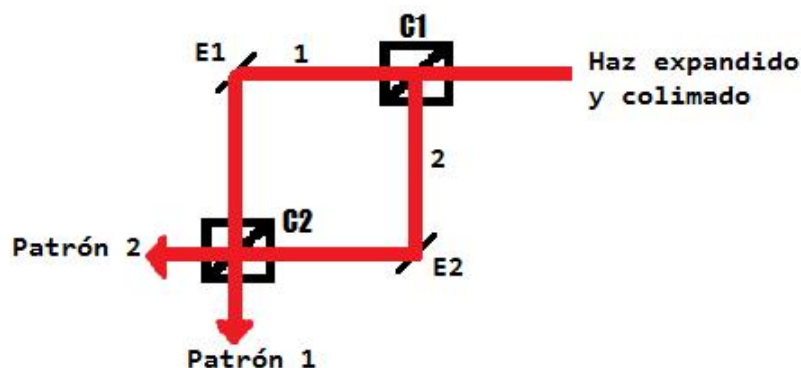


Figura 2-1.: Interferómetro Mach-Zehnder

Esta superposición se realiza a lo largo de dos direcciones perpendiculares entre sí, produciéndose por tanto dos patrones de interferencia (Patrón 1 y Patrón 2 en la figura). Esta configuración, a diferencia de interferómetros como el de Michelson, presenta la ventaja que los dos caminos (brazos del interferómetro) son completamente independientes entre sí, y la luz solo los recorre en un solo sentido. Esto posibilita modificar cada uno de los brazos de manera independiente. Además, dadas las características de esta configuración, los caminos ópticos están compensados, en particular, los dos haces atraviesan la misma cantidad de vidrio. Por otra parte, dado que la superposición de la luz a la salida del interferómetro se

realiza en dos direcciones, es posible colocar un sensor a lo largo de una de estas direcciones (la del Patrón 1 por ejemplo), y simultáneamente proyectar sobre una pantalla el otro patrón para su observación directa. Si como en nuestro caso, la onda que ingresa al sistema es una onda plana monocromática, a la salida del interferómetro se superponen dos ondas planas coherentes, dando lugar a un patrón de interferencia con franjas paralelas equidistantes, cuya orientación y período dependerá de las direcciones de propagación de las dos ondas. El período de las franjas depende de la longitud de onda de la fuente (λ) y del ángulo entre los vectores de onda (θ) y viene dado por la siguiente expresión:

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (2-13)$$

La inclinación de las franjas depende del plano en el cual se encuentren los vectores de onda. Las franjas siempre serán normales a este plano. Entonces, la diferencia de fase entre las ondas y las características del patrón de interferencia en principio pueden modificarse y controlarse de distintos modos. En particular, puede introducirse una pequeña diferencia de fase entre los haces por una ligera inclinación de uno de los espejos reflectores, o desplazarse uno de estos espejos en la dirección perpendicular a su superficie. En el primer caso se modifican localmente las diferencias de fase y la orientación y el período de las franjas de interferencia en general cambia; en el segundo caso el cambio de fase introducido es global y el período no cambia. En la figura 2.2 se observa un interferograma convencional producido por un interferómetro Mach-Zehnder. Esta imagen fue tomada en el laboratorio de Óptica Aplicada de la Universidad EAFIT, y corresponde al patrón de interferencia observado en el interferómetro que fue implementado para el presente proyecto.

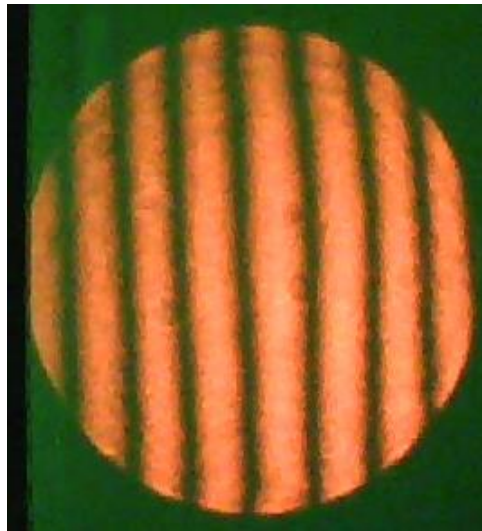


Figura 2-2.: Patrón de interferencia producido por un Mach-Zehnder

Obsérvese que el interferómetro produce franjas paralelas en dirección casi vertical, lo que

significa que en este caso los vectores de onda están aproximadamente sobre un plano horizontal. Es interesante notar además que la visibilidad de este patrón es muy alta. Esta es una consecuencia de haber empleado un láser de He-Ne, cuya longitud de coherencia es mucho mayor que las pequeñas diferencias entre los caminos ópticos en el interferómetro, y al hecho de haberse igualado las intensidades de los haces. Los límites del patrón de franjas se corresponden con el diafragma de campo circular del objetivo de microscopio que fue empleado para amplificar el sistema de franjas. El diámetro de la región iluminada en la imagen es aproximadamente 7cm.

2.2. Sistemas de estabilización de franjas

Existe una gama muy amplia de experimentos y aplicaciones en óptica, e instrumentación óptica, basadas en la interferencia de dos o más ondas de luz coherente y que requieren control de estabilidad. Una de ellas, la holografía. La holografía se basa en el registro de un patrón de franjas de interferencia, producidas mediante luz láser. Dichas franjas por lo general tienen frecuencias espaciales muy altas, típicamente miles de franjas por milímetro, por lo cual se requieren condiciones de estabilidad especiales para evitar el movimiento de las franjas y el consecuente borronado de las mismas en los registros. Ordinariamente en un registro holográfico un movimiento del orden de 0.5 micras es suficiente para producir la pérdida de la información, con lo cual, el sistema de estabilización que se use debe ser eficiente y confiable. Entre las causas de inestabilidad en las franjas, se encuentran las vibraciones mecánicas de los componentes ópticos, las perturbaciones externas transmitidas al arreglo experimental, las variaciones térmicas en el camino de los haces láser que interfieren, y la inestabilidad del láser mismo. Las fuentes mecánicas de vibración en edificios se ubican a frecuencias bajas, entre 4 y 100 Hz (Amick et. al. 2005); éstas son bombas de vacío, elevadores, la descarga de sanitarios, compresores de aire, tráfico vehicular transmitido a los edificios, entre otras. La mayoría de estos movimientos son tan sólo verticales, pero en los pisos superiores de edificios la vibración horizontal es considerable. El equipo eléctrico también es una fuente de vibración; los transformadores y los ventiladores producen vibraciones entre 50 y 400 Hz. Las vibraciones acústicas se ubican en frecuencias intermedias y altas, entre 100 y 15000 Hz; de éste intervalo posiblemente las más nocivas, por su amplitud y probable acoplamiento con las componentes ópticas, son las que se encuentran entre los 200 y 2000 Hz. Una forma de contrarrestar estos efectos es la disminución del tiempo de los registros (aumentando la potencia de los láseres utilizados), otra es la utilización de configuraciones experimentales especiales, no siempre viables, o la utilización de sistemas de estabilización de franjas. Los sistemas de estabilización de las franjas de interferencia se pueden clasificar en dos grupos: pasivos y activos. Entre los pasivos se cuentan diversas estructuras de soportes y mesas para los dispositivos ópticos usados, los cuales deben ser extremadamente estables y aislados

de vibraciones externas (Fernandez 1998. Muñoz 2010). Concretamente, se utilizan mesas aisladas para experimentación óptica, metrología y otras aplicaciones que requieren gran estabilidad. En general, estas mesas, llamadas mesas holográficas o mesas ópticas, son bastante masivas (de más de 100 kg), lo que les permite absorber eficientemente las vibraciones que se transmiten por el suelo y los soportes de la mesa. Algunas de ellas se caracterizan por tener sistemas neumáticos de absorción de vibraciones en sus soportes y una mínima área de contacto entre éstos últimos y la parte superior de la mesa. Este tipo de sistemas de estabilización son bastante costosos y por ser de gran tamaño y masa, su importación es costosa también. Además tienen la desventaja de que no son portables, lo que impide que se usen en distintas aulas o en alguna aplicación que se requiera fuera del laboratorio. Por otra parte, se debe tener presente que existen perturbaciones que afectan la estabilidad de un sistema de franjas interferométricas que no pueden ser eliminadas por un sistema pasivo por ejemplo, variaciones locales de temperatura o vibraciones acústicas propagándose en el aire, por lo que en ocasiones se necesitan sistemas adicionales de estabilización; específicamente, los que se conocen como sistemas activos. Los sistemas activos de estabilización sirven para mantener un patrón de franjas estabilizado, realizando ajustes (en tiempo real) para compensar las diferencias de fase causadas por alguna perturbación externa, sea esta de tipo mecánico, térmico, o de otra naturaleza. En la actualidad se pueden encontrar sistemas comerciales de estabilización de franjas (OdhnerHolographics, 2012). En esencia, la operación de estos sistemas se basa en la posibilidad de reajustar en tiempo real algún parámetro del esquema experimental, por ejemplo la posición de un espejo o cualquier otro elemento, de acuerdo con las variaciones que se produzcan en el patrón de franjas interferométricas de interés. Para ello se requiere una señal de realimentación en el patrón de salida, que es detectada mediante sensores apropiados y procesada mediante un computador o un sistema embebido de control, para producir la señal que servirá para realizar, usualmente mediante actuadores electro-mecánicos u opto-electrónicos, los ajustes que mantendrán el patrón estable. Una descripción más detallada y una breve historia del desarrollo de los sistemas de estabilización de franjas pueden consultarse en la referencia (Chung, 2002), a partir de la cual se elaboró la siguiente síntesis. Neuman y Rose (Neumann, 1967) diseñaron el primer sistema de estabilización para holografía, que consistía en un microscopio que amplificaba el patrón holográfico, y con un fotodetector para medir los cambios en las franjas. La señal del fotodetector es usada como realimentación para producir una compensación en el patrón de franjas por medio de un modulador de fase ubicado en uno de los brazos del interferómetro, de tal forma que el patrón pueda ser estabilizado en todo momento. En 1976, Johanson (Johanson, 1976) propuso el uso de un registro previamente grabado en el sistema, de tal forma que la superposición del actual patrón de franjas con el holograma previamente grabado, produjera un patrón de franjas de Moire. Con este método, los cambios de fase en las franjas de interferencia del registro holográfico generan un cambio de periodo en el patrón de franjas de Moire, con un factor de amplificación de alrededor de 104, de tal forma que los desplazamientos en el patrón de interferencia micrométrico pueden ser fácilmente observables. En 1977, MacQuigg

(MacQuigg, 1977) mejoró los diseños de Newmann y Rose y de Johanson al introducir una pequeña señal de compensación en el modulador de fase, permitiendo el uso de un amplificador Lock-in en la realimentación del sistema. En este caso no se mide la intensidad de la señal en el patrón de interferencia, sino las variaciones de esta. Otra aproximación al problema de la amplificación de patrones holográficos usados en sistemas comerciales es el uso de placas de vidrio que, al transmitir parte de la luz y reflejar la otra parte formando un ángulo muy pequeño entre los haces, generan un gran patrón de interferencia detrás de la placa, el cual se observa como una amplificación espacial de alta ganancia del patrón microscópico original. En los métodos descritos anteriormente, la detección de los desplazamientos se lleva a cabo fuera del patrón holográfico, esto es, fuera del lugar donde éste se registra, lo cual puede constituirse en una desventaja. En este sentido, en 1985 (Frejlich et. al. 1988) la estabilización propuesta por MacQuigg fue mejorada usando conceptos de superposición de ondas para explicar el patrón de franjas de Moire. Este análisis permitió establecer una relación entre el patrón de Moire, las franjas holográficas microscópicas y el holograma de referencia, lo que llevó a tener nuevas posibilidades de aplicación de este sistema de estabilización. La más importante de estas posibilidades es el uso del holograma que se está grabando como referencia para estabilizar la exposición. A este proceso se le llama grabación holográfica auto estabilizada (Chung, 2002). El desempeño logrado con este sistema realimentado es tan bueno, que aun pequeños cambios en la configuración del sistema se pueden compensar con el sistema de estabilización (Cescato, 1987). En el caso particular de los sistemas activos de estabilización de franjas interferométricas, la teoría de control ha desempeñado un papel vital a la hora del diseño de sistemas de este tipo, en tanto que la implementación de estos sistemas recurre a estrategias muy diversas. Los más comunes utilizan el control electrónico para ajustar la longitud que recorre la luz en uno de los brazos de interferómetro, utilizando actuadores piezoeléctricos. Algunos toman la variable procesada con un par de fotodiodos y la analizan con un computador (Heilmann, 2001. Manohar, 1987); otros toman la señal de control con una cámara CCD (Santos 1990. Young 2006. Cadena 2006. Odhner Holographics, 1981). También se han diseñado sistemas de estabilización activos usando fibras ópticas en procesos de holografía (Santos, 1990. Corke, 1985. Muhs, 1988), al igual que amplificadores Lock-in para el análisis de la variable procesada (Soltz, 1996). Pero en cualquier caso, lo que se logra con estos sistemas es controlar la diferencia de fase entre los haces y mantener fijo el patrón de franjas de interferencia, a pesar de que el sistema sea perturbado externamente.

2.3. Sistemas de control

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Este se ha convertido en una parte importante e integral en los sistemas de vehículos espaciales, en los sistemas robóticos, en los procesos modernos de fabricación y en cualquier

operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, posición etc. (Ogata 2010). En años recientes se ha incrementado el uso de controladores digitales en sistemas de control. Estos se utilizan para alcanzar el desempeño óptimo; en particular, por medio del control por computadora se ha hecho posible el movimiento inteligente de robots industriales, la optimización de la economía de combustible en automóviles y el refinamiento en las operaciones de los enseres y máquinas de uso doméstico, tales como hornos microondas y lavadoras, entre otros. La capacidad en la toma de decisiones y la flexibilidad en los programas son las mayores ventajas de los sistemas de control digital, principalmente por la disponibilidad actual de computadoras digitales de bajo costo y por la ventaja de trabajar con señales digitales en lugar de señales en tiempo continuo. (Ogata 1996).

2.3.1. Sistemas de control en tiempo continuo y discreto

Una señal analógica es una señal definida en un intervalo continuo de tiempo cuya amplitud puede adoptar un intervalo continuo de valores, mientras que una señal en tiempo discreto está definida para valores de tiempo discretizados (aunque la amplitud pueda adoptar valores en un intervalo continuo). Las señales digitales, que son las de interés en este trabajo, son aquellas que están definidas en tiempo discreto, pero la amplitud está cuantificada, esto es, solo puede tomar valores en un conjunto discreto de valores.

Los sistemas de control en tiempo discreto son aquellos sistemas en los cuales una o más de las variables pueden cambiar solo en valores discretos de tiempo. Estos instantes, que se denotan mediante kT ($k = 0, 1, 2, \dots$) pueden especificar los tiempos en los que se lleva a cabo alguna medición de tipo físico. El intervalo de tiempo T denominado tiempo o periodo de muestreo es el inverso de la frecuencia de muestreo f_s , la cual, debe ser por lo menos dos veces más grande que la máxima frecuencia contenida en la señal analógica que se está muestreando (Nyquist, 1928. Shannon 1949).

- Variable procesada y señal de control o variable manipulada.

La variable procesada (PV) es la cantidad o condición que se mide y controla. La señal de control o variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable procesada. Normalmente, la variable procesada es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable procesada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación (error) del valor medido respecto del valor deseado (Setpoint o SP) (Ogata 2010)

2.3.2. Identificación de sistemas

La identificación de un sistema consiste en la construcción de un modelo matemático de un sistema dinámico basado en un conjunto de datos de muestra de entrada y salida. La identificación del modelo de la planta ¹ es un proceso de varias etapas. Primero se adquiere un conjunto de datos de entrada y salida de la planta que se quiere controlar, luego se procesan los datos de ser necesario, y finalmente se selecciona un algoritmo matemático que permita crear el modelo matemático del sistema. De esta forma, se puede usar este modelo matemático para analizar las características dinámicas del sistema, simular la respuesta del mismo y por supuesto diseñar un controlador basado en dicho modelo.

Los sistemas físicos raramente tienen solo un modelo que describa perfectamente todos los comportamientos del mismo. Esto debido a que la identificación de sistemas involucra muchas variables, como la frecuencia de muestreo, el tipo de modelo matemático y el orden del modelo. Lo más usual es que existan varios modelos que se puedan obtener. Cada uno describe el comportamiento del sistema hasta cierto grado o en un modo particular de operación. Más aún, para el mismo modelo puede haber disponibles varios algoritmos. Este algoritmo que se escoge, generalmente depende de la estructura del modelo, asunciones estocásticas y propiedades numéricas del algoritmo (Goodwin 1977. Ljung 1999).

Para realizar una adecuada identificación del sistema, en primer lugar se debe escoger la señal de estímulo adecuada para la toma de datos. Esta escogencia cobra un papel importante en el comportamiento y precisión del modelo estimado. Para obtener un comportamiento dinámico significativo del modelo, la señal de estímulo debe contener frecuencias y amplitudes similares a las señales a las que normalmente está sometido el sistema. Para lograr esto, algunas señales de estímulo que convencionalmente se usan son: señal de ruido blanco gaussiano filtrado, señal aleatoria binaria, secuencia binaria pseudo aleatoria y forma de onda chirp.

Otro factor que se debe tener en cuenta es la tasa de muestreo, ya que si se escoge una tasa muy alta, habrá redundancia de datos y posibles problemas numéricos debido al ruido. Si se escoge una tasa muy baja, el modelo encontrado podría no representar adecuadamente el sistema debido al aliasing, esto es, debido a que eventualmente por la tasa tan baja, los datos tomados podrían representar una señal con una frecuencia de la cual la frecuencia de la señal deseada sea múltiplo. Una regla común es aplicar una frecuencia de muestreo que sea 10 veces el ancho de banda que se desea para el modelo. Es posible que luego de la adquisición de la respuesta del sistema ante esta señal de estímulo se necesite filtrar

¹Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. En control se le llama planta a cualquier objeto físico que se va a controlar (como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial), en nuestro caso, el sistema compuesto por el Interferómetro y el actuador compensador

y/o bajar la frecuencia de muestreo basado en un análisis de la respuesta en frecuencia del sistema (National Instruments, 2004). Esto debido a que mientras menos datos se cuenten en la identificación, menos “pesado” será el cálculo en la identificación del sistema.

Luego del preprocesamiento de los datos, uno de los retos más grandes en la estimación del modelo es la elección correcta de éste, y del orden del mismo. Para la estimación del orden, existen algunos criterios como el FPE (Final Prediction Error Criterion), AIC (Akaike’s Information Criterion) y MDL (Minimum Data Length criterion). En algunas ocasiones los resultados que se obtienen con estos criterios son inconsistentes; para esto se puede usar un diagrama de polos y ceros que permita verificar los resultados de la estimación del orden en cuanto a estabilidad.

Finalmente, se debe escoger el método de estimación para el modelo. Generalmente, se puede describir un sistema usando la siguiente ecuación, la cual se conoce como modelo polinomial general lineal:

$$y(n) = q^{-k}G(q^{-1}, \theta)u(n) + H(q^{-1}, \theta)e(n) \quad (2-14)$$

en donde $u(n)$ y $y(n)$ son la entrada y la salida del sistema, respectivamente; $e(n)$ es la perturbación a la que está sometido el sistema; $G(q^{-1}, \theta)$ es la función de transferencia de la parte determinista del sistema, la cual especifica la relación entre la salida y la entrada del sistema; $H(q^{-1}, \theta)$ es la función de transferencia de la parte estocástica del sistema, la cual muestra cómo la salida del sistema es afectada por la perturbación; el vector θ es el conjunto de parámetros del modelo y el término q^{-1} es el operador de retardo, definido por $q^{-1}x(n) = x(n-1)$.

$G(q^{-1}, \theta)$ y $H(q^{-1}, \theta)$ son los polinomios definidos por las siguientes ecuaciones:

$$G(q^{-1}, \theta) = \frac{B(q, \theta)}{A(q, \theta)F(q, \theta)} \quad (2-15)$$

$$H(q^{-1}, \theta) = \frac{C(q, \theta)}{A(q, \theta)D(q, \theta)} \quad (2-16)$$

Las siguientes ecuaciones definen $A(q, \theta), B(q, \theta), C(q, \theta), D(q, \theta), F(q, \theta)$:

$$A(q, \theta) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_nq^{-n_a} \quad (2-17)$$

$$B(q, \theta) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_nq^{-n_b} \quad (2-18)$$

$$C(q, \theta) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_nq^{-n_c} \quad (2-19)$$

$$D(q, \theta) = 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} + \dots + d_nq^{-n_d} \quad (2-20)$$

$$F(q, \theta) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_nq^{-n_f} \quad (2-21)$$

donde n_a, n_b, n_c, n_d y n_f son los órdenes del modelo.

La figura 2-3 muestra el diagrama de flujo de un modelo general lineal.

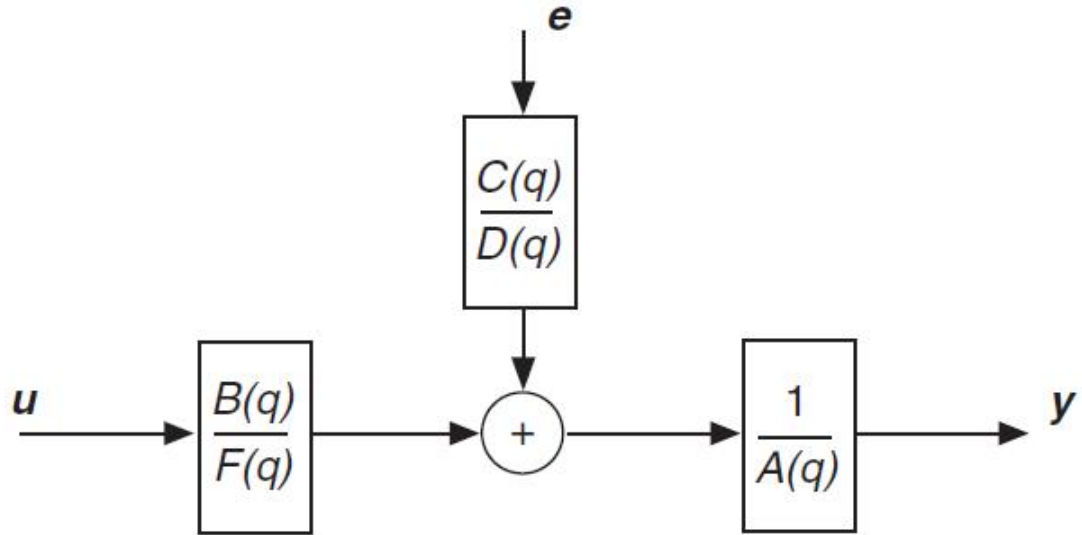


Figura 2-3.: Diagrama de flujo de un modelo general lineal

Asignando uno o más de los polinomios $A(q, \theta)$, $C(q, \theta)$, $D(q, \theta)$ o $F(q, \theta)$ igual a 1 se pueden crear modelos más simples como AR, ARX, ARMAX, Output-Error y Box-Jenkins (National Instruments, 2004).

Los algoritmos matemáticos que permiten identificar modelos pueden ser simulados, calculados y diseñados en herramientas computacionales como LabVIEW SystemIdentificationToolkitTM o MATLAB SystemIdentificationToolboxTM.

2.3.3. Controladores PID

Un PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido (PV) y el valor que se quiere obtener (SP), para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo de la señal de control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo.

La acción proporcional se calcula como el error multiplicado por un valor llamado constante proporcional, buscando que el error en estado estacionario sea casi nulo; pero en la mayoría de los casos estos valores solo serán óptimos en una determinada porción del rango del error, siendo distintos los valores óptimos dependiendo de la posición de la PV. Es interesante

mencionar que para que la acción proporcional actúe como controlador es necesario que el error sea distinto de cero, por lo que esta sola acción frecuentemente no proporciona condiciones óptimas de control.

En el control integral de una planta, la señal de control es en todo momento el área bajo la curva de la señal de error hasta el momento; de esta forma, la señal de control tiene un valor distinto de cero cuando la señal de error es cero. La señal de control integral elimina el offset o el error en estado estacionario.

La acción de control derivativa (proporcional a la derivada del error), aporta un modo de obtener un controlador con alta sensibilidad. Una ventaja de usar una acción de control derivativa es que responde a la velocidad de cambio del error, y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Por lo tanto, el control derivativo prevé el error, inicia una acción correctiva oportuna y tiende a aumentar la estabilidad del sistema. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema, y por tanto, permite el uso de un valor más grande de la ganancia proporcional, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estacionario. (Ogata, 2010)

2.4. Plataformas virtuales de experimentación

Existen numerosas áreas de la ciencia que requieren fuertes inversiones en equipos sofisticados, con los cuales son abordados buena parte de los problemas científicos. Este hecho ahonda la brecha tecnológica entre los países desarrollados, que pueden destinar altos presupuestos, y los países en desarrollo, con baja capacidad de asignación de recursos a áreas estratégicas de la ciencia de frontera. No obstante, las posibilidades que dan las redes de alta velocidad para adelantar la denominada e-ciencia, presentan interesantes alternativas para trabajo colaborativo entre países desarrollados y países en desarrollo o solo entre estos últimos (Fundación Española para la Ciencia y la tecnología 2004). Esta alternativa es, por ejemplo, el acceso remoto a instrumentos avanzados, costosos, pero altamente eficaces para apoyar proyectos científicos, que puedan estar ubicados en centros de investigación europeos o americanos, o que puedan ser adquiridos por varias comunidades científicas, amortizando así su costo entre regiones o inclusive entre países. En el mundo son relativamente recientes estas iniciativas, como por ejemplo el proyecto RINGrid, iniciado en el 2006, el cual tiene como propósito definir recomendaciones para el diseño de los servicios de instrumentación remota de próxima generación. El proyecto es parcialmente financiado por la Comisión de la Comunidad Europea: European Commission Information Society and Media dentro del programa marco FP6, enfocado a desarrollar un nuevo entorno para la investigación, por medio del cual los investigadores tengan acceso compartido a facilidades científicas distri-

buidas (RINGrid, 2006). Los principales objetivos de RINGrid incluyen la identificación sistemática de instrumentos y las correspondientes comunidades usuarias, una definición de sus requerimientos, así como un cuidadoso análisis de la sinergia entre la instrumentación remota y las redes de comunicaciones de alta velocidad de próxima generación e infraestructura Grid como sustento para la definición de recomendaciones para el diseño de servicios de instrumentación remota de próxima generación. En Chile, existe una Grid de instrumental científico que inició con un proyecto pionero de colaboración y creación de una Grid nacional de instrumentos científicos especializados en el análisis de muestras orgánicas e inorgánicas, conectados, a través de la Red Académica, REUNA. Esta Grid se denomina UCRAV, y ha sido generada sobre la base de los proyectos financiados por CORFO; en el primero el objetivo principal fue establecer un piloto que permitiera probar la factibilidad real de integrar instrumental en Red y en el segundo proyecto se esperaba dejar una plataforma de servicios operativa en beneficio de las universidades y el sector productivo (Grid, 2006.). En Colombia, las iniciativas estructuradas para conformar un Grid de instrumentos científicos avanzados, sobre una red de alta velocidad son aun escasas, a pesar de que se han desarrollado algunos proyectos de acceso remoto a instrumentos. En este sentido, la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, habilitó el uso por parte de usuarios remotos de equipos de difracción de rayos X, espectrómetros FT-IR, amplificadores Lock-in, osciloscopios digitales de alta velocidad, entre otros. No obstante, para la época de los desarrollos, no se contaba con la infraestructura de redes avanzadas, como la de hoy con RENATA (Red Nacional de Tecnología Académica de Tecnología Avanzada). Haciendo uso de esta red, la Universidad EAFIT, desarrolló recientemente una plataforma para el acceso remoto a diversos instrumentos avanzados de laboratorio, vía RENATA para usuarios en las regionales RUANA y RADAR. Este proyecto fue liderado por el Grupo de Electromagnetismo Aplicado de EAFIT (Arroyave, 2011).

3. Diseño e implementación del sistema

En el presente capítulo se hace una descripción detallada del diseño del sistema de estabilización de franjas propuesto. En la sección 3.1 se muestra el PDS (Product Design Specification) en el que se describen detalladamente las especificaciones y requerimientos del sistema. En la sección 3.2 se describe el sistema de control por medio de un diagrama de bloques, en el que se muestra cómo el computador es el elemento central que monitorea y controla las variables más importantes del sistema. En la sección 3.3 se describen cada uno de los componentes del interferómetro Mach-Zehnder en el que se hizo la instrumentación del sistema de control, así como en la 3.4, se presentan los componentes opto-electrónicos de sensado y actuación que se implementaron en el mismo. Finalmente, en la sección 3.5 se describe detalladamente la interface de usuario que se diseñó y todas las variables de entrada y salida que tiene el instrumento virtual diseñado en labVIEW™.

3.1. PDS(Product Design Specification)

A continuación se enumeran los aspectos aplicables al diseño del sistema de estabilización de franjas interferométricas tomados del artículo “Points to cover in a PDS” de “The Design Society” [The Design Society, 2011]. Las siguientes son las especificaciones requeridas desde el principio del proyecto.

3.1.1. Desempeño

Se necesita un sistema que controle la posición de un patrón de franjas interferométricas para un interferómetro Mach-Zehnder.

El sistema debe controlarse desde un computador y permitir desde el mismo, tanto introducir perturbaciones por medio de un actuador piezo-eléctrico montado en uno de los brazos del interferómetro, como compensar en tiempo real los cambios de fase producidos por tales perturbaciones por medio de otro actuador montado en el otro brazo del interferómetro y mantener el patrón de franjas en una posición deseada.

La variable que permitirá realizar una evaluación de desempeño será en principio a visibilidad del patrón. Ésta no debe ser inferior a 0.6 cuando se introduzcan adrede perturbaciones que lleven esta visibilidad a cero cuando no actúa el controlador.

El sistema diseñado debe procesar las capturas del sensor en el patrón con una frecuencia superior a los 100 fps.

Se debe configurar la plataforma de acceso al sistema para que se pueda acceder a ella remotamente por medio de la red RENATA.

Se debe diseñar un experimento y un manual de usuario para que un usuario remoto se pueda familiarizar con la plataforma y tener acceso a ella para evaluar la capacidad del sistema de control de compensar diferencias de fase producidas por perturbaciones conocidas.

3.1.2. Facilidades de manufactura

Los equipos optoelectrónicos tales como láser, espejos, cubos divisores, cámara y actuadores serán adquiridos en el exterior con rubros procedentes de un proyecto de investigación aprobado en la universidad EAFIT. Esta misma fuente de rubros también será utilizada para adquirir tanto el computador como las licencias de los programas requeridos, y también para cubrir los gastos de personal que incluyen los investigadores y el becario.

Los conocimientos de física, instrumentación y programación necesarios para cumplir con los objetivos del proyecto, se encuentran en su totalidad entre los miembros del grupo de investigación en Óptica Aplicada de la universidad EAFIT, de tal forma que no será necesario en principio contratar personal externo.

3.1.3. Usuarios y requerimientos de la interface

Los principales usuarios del sistema que se quiere implementar son investigadores y estudiantes remotos que eventualmente no tengan acceso a los dispositivos necesarios para estudiar los principios básicos de interferometría y control de posición de un patrón de franjas.

Se requiere entonces una interface amigable que pueda ser manipulada remotamente sin la adquisición de programas no gratuitos. Es deseable que la plataforma genere un reporte de las mediciones hechas por el experimentador a las que él pueda acceder luego de realizada la experimentación.

3.1.4. Fiabilidad en las mediciones

Como punto de partida se espera que el sistema detecte la posición del patrón con un error no mayor de $1mm$. Además se desea que el sistema de control compense diferencias de fase producidas por perturbaciones del orden de los 30 Hz.

3.1.5. Tiempo de diseño

El tiempo estimado de diseño e implementación para la entrega del sistema funcional es de 12 meses a partir de Junio de 2012, fecha en la que se entregó el anteproyecto a un comité evaluador.

3.2. Conceptualización del sistema

El objetivo principal del sistema de control diseñado es mantener la posición de un patrón de franjas de interferencia en un valor deseado que llamaremos setpoint (SP). Debido a que el patrón de interferencia está compuesto por una serie de máximos y mínimos de intensidad, y dado que en general observamos (en la curva de Intensidad Vs Posición del patrón) mayor cantidad de ruido asociado con la posición de los máximos, en relación con el ruido observado en los mínimos, para la implementación del algoritmo se decidió encontrar y seguir la posición de un mínimo del patrón elegido a voluntad. El mínimo elegido se toma como referencia para ubicar la posición del patrón de franjas en lo sucesivo, y por tal motivo se le llamará mínimo de referencia. En la figura 3.1 se observa que el sistema tiene realimentación negativa, donde la señal de error (e) es la resta entre el SP y la posición del mínimo de referencia, que llamaremos variable procesada (PV). El SP es tomado como la posición de este mínimo de referencia cuando el sistema empieza a observar el patrón, esto es, el SP es la PV en la iteración 0 del ciclo computacional.

Debido a que el sensado se hace de manera digital, empleando una cámara CCD lineal (LC100 de Thorlabs), las posiciones para el SP y la PV, y el valor del error están dados en pixeles, de tal forma que para el controlador, la entrada es en pixeles y la salida es en voltios (El controlador debe entenderse como el algoritmo en labVIEW que recibe la señal de error en pixeles y envía una señal en voltios al actuador compensador). Esta salida del controlador (en voltios) es la entrada para el actuador piezoeléctrico 1, el cual modifica la longitud de camino óptico que recorre la luz en uno de los brazos del interferómetro, a través del movimiento de un espejo, y es el encargado de posicionarse de tal forma que el mínimo seleccionado del patrón de interferencia vuelva a la posición del SP cuando el error es distinto

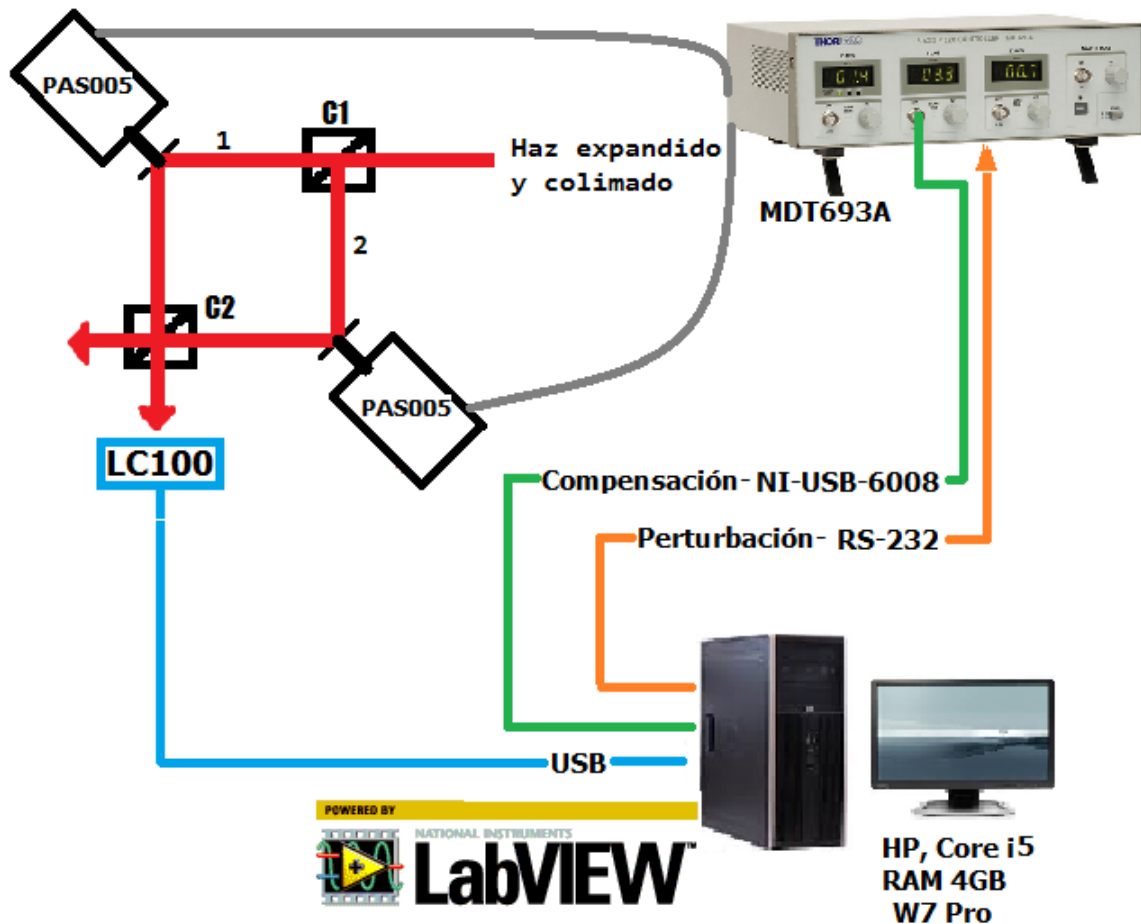


Figura 3-1.: Diagrama general del sistema implementado

de cero. En el otro brazo del interferómetro hay otro espejo sobre el cual actúa otro actuador, el cual, manejado desde el computador, puede modificar la longitud de camino óptico del brazo respectivo, siguiendo una señal escogida a voluntad. Esta señal se constituye en una perturbación introducida al interferómetro, que no obstante puede anularse si se desea. Esta señal es utilizada para evaluar la capacidad del sistema para controlar perturbaciones con distinto perfil y distintas amplitudes y frecuencias. Pueden elegirse perfiles cosenoidales, cuadrados, triangulares, en forma de rampa y chirp. Cabe mencionar que el computador es parte fundamental de este sistema, ya que por medio de la cámara permite monitorear en tiempo real el patrón de interferencia, y por medio de los actuadores 1 y 2, permite actuar sobre el sistema para realizar el control y la perturbación, respectivamente.

3.3. Características del interferómetro

El interferómetro implementado es del tipo Mach-Zehnder (ver figura 3.2) con un láser (L) de He-Ne polarizado de 7mW (1137P de Edmund Optics) que emite luz con longitud de onda de 632.8 nm. La escogencia del láser estriba en que ofrece mayor estabilidad que uno de estado sólido.

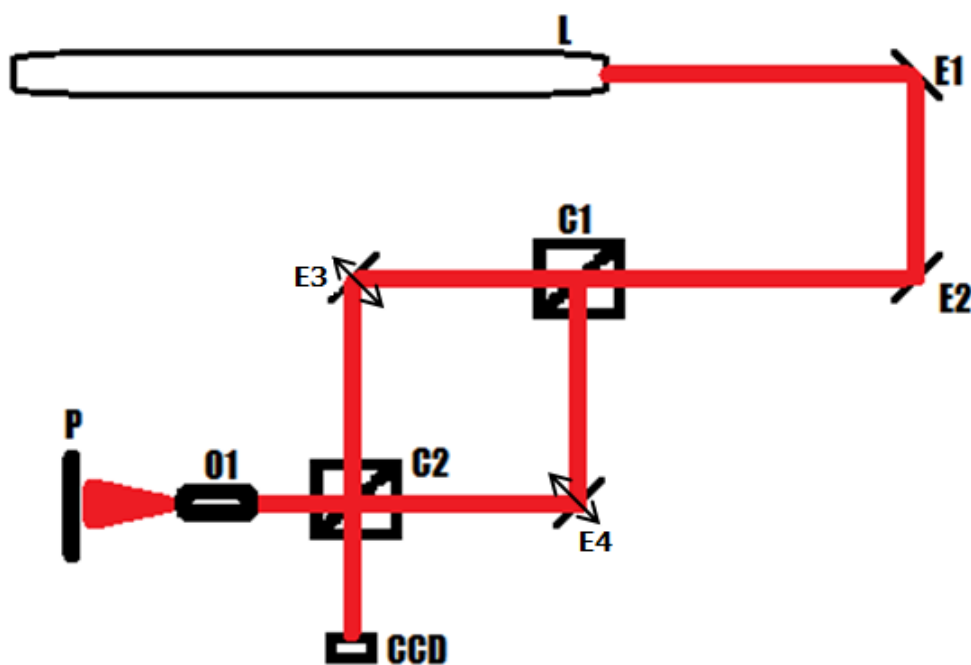


Figura 3-2.: Interferómetro implementado. L: Láser, E1, E2, E3 y E4: Espejos, C1 y C2: Cubos divisores de haz, CCD: Cámara, O1: Objetivo de microscopio, P: Pantalla

Los cubos divisores (C1 y C2) que se usan son 50/50 no polarizados y el sistema de franjas puede observarse tanto en una pantalla (P) como mediante una cámara lineal CCD. Para la visualización del patrón en la pantalla, el haz se expande con un objetivo microscopio (O1).

El interferómetro configurado de esta manera posibilita que en uno de sus brazos se pueda introducir una perturbación conocida, elegida desde el PC, mientras que en el otro brazo se puede actuar con una señal calculada por el sistema de control, a partir de la detección mediante el sensor CCD, de los cambios de posición de las franjas. Los espejos E3 y E4 pueden moverse en dirección perpendicular a su superficie, modificando la longitud de camino óptico de los brazos respectivos, utilizando los actuadores 1 y 2. De este modo, sobre el sistema óptico puede introducirse la perturbación sobre el sistema óptico y en línea compensarla mediante el ciclo de control.

3.4. Componentes optoelectrónicos de sensado y actuación

Para el sensado se utiliza una cámara LC100 de Thorlabs (ver figura 3.3) con un sensor CCD lineal de 2048 pixeles, de $14\mu m$ de ancho x $56\mu m$ de alto. Esta cámara posibilita tener una tasa máxima de escaneo de 900 FPS en el modo de captura continua y de alrededor de 300 FPS en el modo de captura simple, tasas de muestreo que son bastante altas para el objetivo de este proyecto.

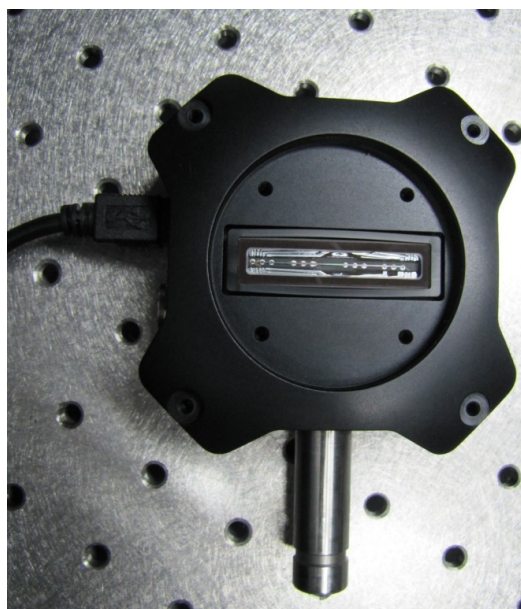


Figura 3-3.: Cámara lineal Thorlabs LC100 conectada a su interface USB y al soporte

El tiempo de integración es ajustable por software, entre 1.05 ms y 50 s. El CCD es sensible a longitudes de onda entre los 350nm y los 1100nm. Esta cámara tiene una interface USB 2.0, que permite acceder a ella desde el software que provee el fabricante (Splicco®) o desde un software como labVIEW™.

Los espejos E3 y E4 (Ver figura 3.2) están montados sobre sendos actuadores piezoeléctricos (PAS005 de Thorlabs), los cuales, según se explicó antes, tienen la función de introducir perturbaciones al sistema (desplazando E3) y de ajustar la posición del patrón a un valor deseado (desplazando E4). Los actuadores montados (ver figura 3.4) tienen un recorrido completo de $20\mu m$ y un voltaje de entrada de 0 a 75 V. El driver que les suministra el voltaje es el MDT 693A, de Thorlabs, el cual tiene 3 canales, de los cuales se usarán dos para conectar los actuadores. Además, permite un rango de voltaje de salida ajustable entre 0-75V, 0-100V y 0-150V, con una corriente de salida máxima de 60 mA. Utilizamos el primer

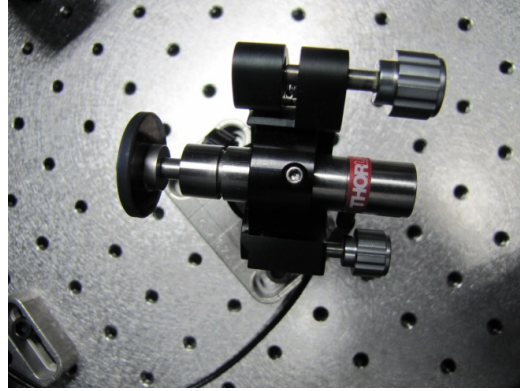


Figura 3-4.: Actuador piezoeléctrico PAS005 de Thorlabs montado en el interferómetro y con un espejo en su terminal

rango. Dado que los actuadores usados (PAS005) tienen una capacitancia de $3.6\mu F$, se puede calcular el máximo cambio de voltaje que puede recibir por unidad de tiempo (Slewrates) por medio de la ecuación (Mandado, 2009):

$$Slewrates = \frac{I_{max}}{C} = \frac{60mA}{3,6\mu F} = 16,7 \frac{V}{ms} \quad (3-1)$$

Esto quiere decir que al demandarle un cambio de 0 a 16.7 voltios al driver (MDT693A) conectado al PAS005 tomará 1ms para alcanzar la posición final del actuador. Este valor (16.7 voltios) está muy por encima de los valores requeridos cuando el controlador esté funcionando, que son del orden de $\pm 1V$ en cada iteración. Por tanto, en cada iteración del ciclo de control el actuador se demorará menos de 0.06 ms para alcanzar la posición deseada, lo que a su vez significa que con este driver se podría mover el actuador en el rango de variaciones de voltaje mencionado a una frecuencia de 16.7 Khz, la cual es bastante superior a la frecuencia máxima a la que puede capturar la cámara CCD.

El driver de este actuador tiene dos formas de controlarse, la primera es vía RS232, el cual utiliza un convertor D/A de 16 bits, lo que permite ajustar valores de voltaje con una precisión de $\pm 3mV$, la cual está asociada con un desplazamiento del actuador de 0.8 nm. El hecho de no poder garantizar una mayor precisión en los desplazamientos no es preocupante para la implementación del sistema, dado que 0.8 nm, está muy por debajo de la longitud de onda de la luz que emite el láser (632.8 nm).

No obstante, el protocolo RS232 que tiene el driver de los actuadores tiene una limitante, a saber, que no se pueden enviar datos a una frecuencia superior a 250 Hz, y como se pretende usar ambos actuadores en tiempo real para perturbar y controlar, esto pondría un cuello de

botella para la frecuencia de muestreo en 125 Hz, por lo que en este punto, se pensó en la posibilidad de usar la segunda forma que tiene este driver para controlarse.

El MDT693A tiene un puerto adicional con ganancia de entrada que permite ingresar un voltaje suministrado al actuador después de ser multiplicado por un factor. Para el caso que nos atañe, la salida del driver está ajustada en 0-75V, de tal forma que el driver multiplica el voltaje en este puerto de entrada por un factor de 7.5 (ajuste dado por el fabricante). Esto quiere decir que cualquier valor de voltaje que se desee en el actuador, se divide entre 7.5 y se le ingresa por este puerto externo. Aunque se podía implementar un circuito para generar este voltaje, se decidió usar una tarjeta de adquisición, para poder controlar este voltaje por medio de software. La tarjeta usada es fabricada por National Instruments y es la USB-6008, la cual tiene una resolución de 12 bits para un voltaje máximo de salida de 5 V, suficiente para alcanzar manejar el rango de voltaje que se necesita en la compensación. (tener presente que este voltaje suministrado por la tarjeta es multiplicado por 7.5).

3.5. Implementación del sistema desde el computador

El interferómetro que se implementó tiene 3 elementos fundamentales que permiten su manipulación desde el computador, a saber, la cámara CCD y los dos actuadores. Para controlar el actuador 2 (perturbador) se usó la interface RS232 y para el actuador 1 (controlador), se accede por medio del puerto USB mediante la tarjeta de adquisición (Ni-USB6008) y el puerto externo de driver MDT693A. Asimismo la cámara CCD se conecta mediante una interface USB.

A continuación se describen los elementos básicos que conforman la interface de usuario diseñada mediante labVIEWTM y todos los controles e indicadores que le permiten al experimentador interactuar con el sistema de estabilización. Se abordará en primer lugar el panel frontal de la aplicación y luego algunas características importantes del diagrama de bloques diseñado.

3.5.1. Panel Frontal

El usuario que manipulará el sistema debe estar en capacidad de observar en pantalla las variables del sistema y de cambiar, por medio de controles, las que se puedan modificar. En la figura 3.5 se observa la interface de usuario que se diseñó, y a continuación se explica el propósito de cada uno de los controles e indicadores que se ven en la figura.

■ Franjas de interferencia

En la esquina superior izquierda se muestra lo que está observando la cámara, es un *waveformgraph* (WFG) llamado *Cámara* en el que el eje horizontal representa cada uno de los 2048 pixeles que tiene la cámara lineal, y el eje vertical es el valor de intensidad asociado a cada pixel con una resolución de 16 bits.

El patrón de interferencia observado por la cámara normalmente ocupa una fracción del sensor, por lo que es deseable en muchos casos observar una zona ampliada de la distribución de intensidad sensada. Por ello se implementaron dos *Sliders* llamados *Lím inferior* y *Lím superior* que permiten escoger entre los 2048 pixeles el intervalo que se mostrará en el segundo WFG que se observa a la derecha del primero. A este segundo, que es una ampliación de una zona del primero, se le llamó *Selección*.

En los perfiles de intensidad observados en estos gráficos se ha implementado un supresor de Offset, esto es, a los 2048 valores de intensidad se le ha restado el valor mínimo de intensidad en el patrón observado. Esto con el fin de que no sea necesario realizar los experimentos con el sistema en oscuridad absoluta. Entonces, en caso de tener una luz encendida en el recinto, el patrón de interferencia que observaría la cámara se representaría en pantalla mediante un perfil de intensidad cuyo valor mínimo sería el nivel de intensidad cero. Esto se hizo pensando en los usuarios remotos que accedan al sistema desde la red RENATA, siendo necesaria en este caso la iluminación suficiente para poder observar el conjunto de dispositivos dispuestos en el recinto, en particular, el interferómetro. Una cámara a la que se tenga acceso remoto y que esté capturando imágenes del interferómetro, tendrá mejor imagen si la zona que está observando está convenientemente iluminada. No obstante, la intensidad de la luz con la que se ilumine el recinto donde se encuentra el interferómetro está limitada por la disminución de la visibilidad del patrón observado por la cámara, esto es, no debe impedir la detección y seguimiento confiable de la posición del mínimo de intensidad de referencia¹.

El software también tiene la posibilidad de filtrar la señal proveniente de la cámara por medio de un filtro FIR pasa-bajas. Esto con el fin de suprimir el ruido ² que se observa en el perfil de intensidad del patrón de interferencia.

Debajo de los Sliders que escogen el intervalo del patrón que quiere ser amplificado,

¹Mientras la intensidad que mida la cámara proveniente de la iluminación del recinto no sea mayor que la máxima intensidad en los máximos de interferencia, no habrá errores en las medidas.

²Este ruido proviene en primer lugar del polvo que se añade a los cubos divisores, los espejos y el sensor de la cámara CCD

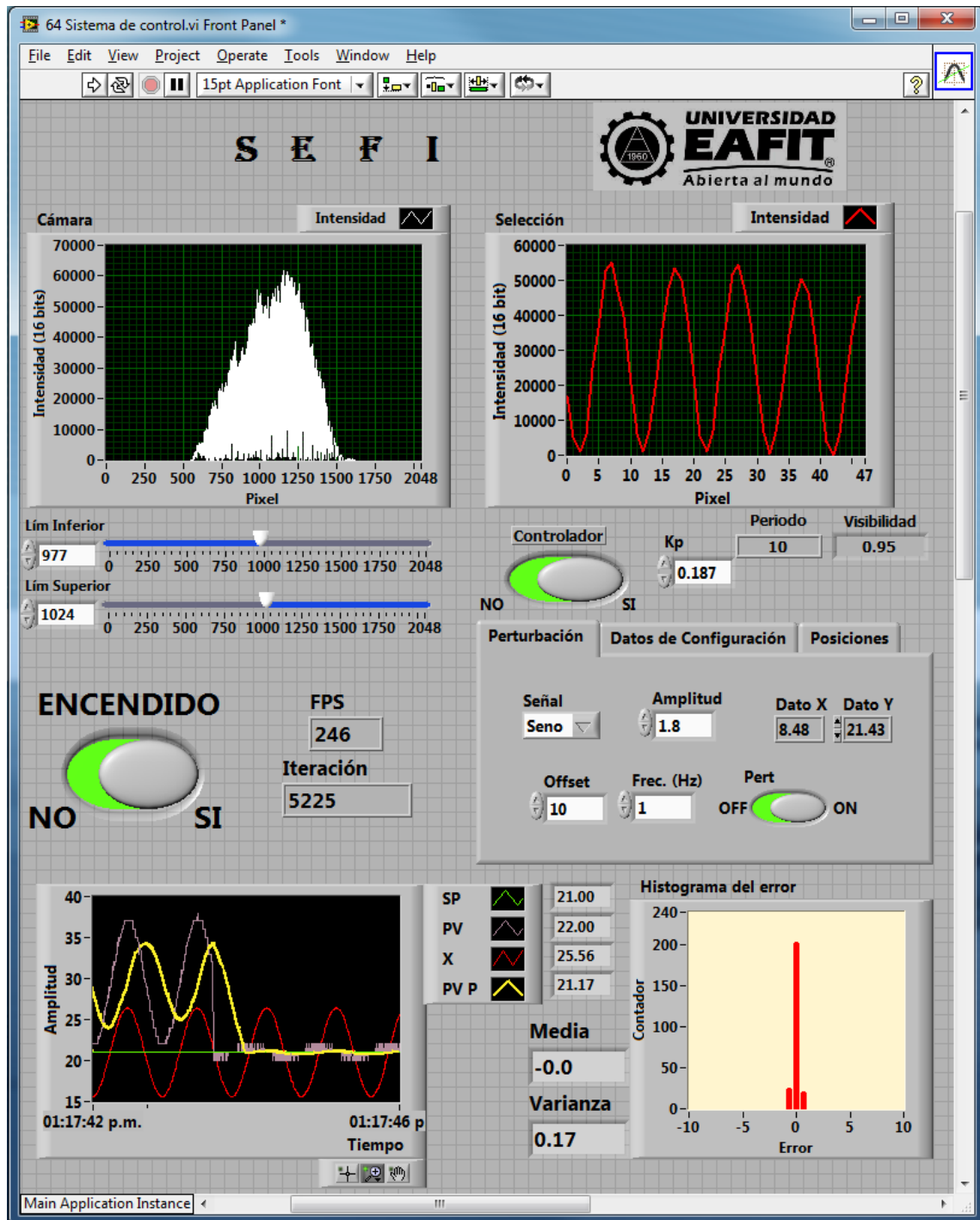


Figura 3-5.: Panel frontal desplegado por el sistema de control implementado en LabVIEW™

aparece el botón de encendido-apagado que permite iniciar el sistema o detenerlo, y al lado derecho de este botón está el indicador del número de cuadros (frames) por segundo (FPS) que están siendo procesados. Asimismo, a la derecha del botón de encendido se encuentra el contador de iteraciones procesadas desde el inicio. Debajo del WFG que muestra un zoom de la zona que se escogió con los sliders, se muestran el periodo espacial del patrón de franjas, medido en pixeles, y la visibilidad del patrón.

Debe aclararse que el valor de la visibilidad no es el de la visibilidad del patrón de intensidad capturado por la cámara en cada frame, que en cualquier caso sería aproximadamente la unidad. Este valor corresponde a la visibilidad del patrón de intensidad que sería observado si se emplearan tiempos de integración mayores a los períodos característicos de las oscilaciones constitutivas de las perturbaciones introducidas en el sistema interferométrico. A su vez, este valor de visibilidad, se establece como un parámetro que indica cuál sería el contraste de un registro del patrón observado por una cámara o registrado por cualquier otro medio de registro considerado lineal si se empleara un tiempo de exposición superior al período temporal característico de las perturbaciones introducidas en el interferómetro. Para el cálculo de la visibilidad se utilizan los valores de intensidad medidos en la posición del setpoint (la del mínimo de referencia para el sistema de control) y en la posición que corresponde a uno de los máximos consecutivos para este mínimo, en el momento en que dicho setpoint fue establecido. Los valores son medidos en estos dos lugares durante 240 iteraciones de captura, y se toma un promedio de la intensidad en los pixeles respectivos. El cálculo de la visibilidad se realiza utilizando estos promedios de intensidades, como sigue:

$$\vartheta = \frac{\bar{I}_{max} - \bar{I}_{min}}{\bar{I}_{max} + \bar{I}_{min}} \quad (3-2)$$

Entonces, en esta ecuación \bar{I}_{max} e \bar{I}_{min} representan los valores promedio de las intensidades, medidas (por defecto, pero ajustable a otros valores) en los 240 ciclos consecutivos de captura de la cámara, en las posiciones del mínimo y uno de los máximos consecutivos elegidos.

Se tomaron por defecto 240 ciclos teniendo en cuenta que la frecuencia de muestreo es aproximadamente 240 Hz, que es muy superior a las frecuencias características de las perturbaciones introducidas en el sistema. Asimismo, el valor de visibilidad se calcula como un promedio, se toman también 240 muestras de tal forma que se esté refrescando aproximadamente cada segundo, que es un tiempo razonable para muchos de los experimentos de registro holográfico realizados en el Laboratorio de Óptica Aplicada de EAFIT. En la parte central del panel frontal, se encuentra un

contenedor de tres pestañas: Perturbación, Datos de Configuración, y Posiciones. A continuación se describirán las funciones habilitadas en cada pestaña.

■ Perturbación

La que aparece por defecto activada (Perturbación) es la que permite escoger el tipo de perturbación que se le introducirá al interferómetro por medio del actuador perturbador. Puede escogerse entre distintos tipos de señales, a saber, con perfil senoidal, triangular, cuadrado, y ruido blanco. También puede escogerse la amplitud en voltios, la frecuencia y el offset respectivos. La señal que se genera por medio de estos controles es la señal de voltaje que se le aplicará al actuador perturbador, en la cual el offset siempre debe tener un valor mayor que la amplitud para evitar enviar voltajes negativos que son ignorados por el driver. Los indicadores *Dato Y* y *Dato X* que se muestran en esta pestaña, son los valores de voltaje en tiempo real que se están enviando a los actuadores compensador y perturbador, respectivamente.

La parte izquierda del panel muestra en la parte inferior un Waveform Chart con cuatro señales: una señal verde que es el setpoint (SP), una señal morada que es la variable procesada (PV) correspondiente a la posición del mínimo de referencia establecida en tiempo real, una señal roja que es la perturbación que se le está ingresando al sistema, y una señal amarilla que es el valor promedio de los últimos 100 datos de la PV, utilizada para visualizar la señal de la posición del mínimo de referencia en tiempo real, pero suprimiendo el ruido; por supuesto, esta es una versión suavizada y retrasada de la señal de PV desplegada en tiempo real.

A la derecha de este Chart se muestra un histograma asociado con el valor de la señal de error ($e = SP - PV$). En este histograma se puede observar el número de veces que fue encontrado un valor de error comprendido en un rango determinado, considerando los últimos 240 ciclos de captura de la cámara.

En la figura 3.5 se muestra el chart de las variables para cuando el sistema estaba perturbado por el actuador 2. En el histograma asociado con el error observado en ese momento, con el controlador encendido, muestra que el valor que más se repite es 0, de donde se infiere que la mayor parte del tiempo el patrón permanece en la posición correspondiente al setpoint. Sin embargo, aunque con menor frecuencia, dicho patrón se aleja de la posición de referencia, uno o dos píxeles a lo sumo en cada dirección. Entonces, con base en la información que da lugar a este histograma, adicionalmente se determinan el valor medio del error, y su varianza. Una adecuada estabilización del patrón de interferencia debería caracterizarse por un valor medio del error cercano a cero, y una varianza convenientemente pequeña. Cuanto menor sea la varianza asociada

con el error, tanto menor será la probabilidad de encontrar valores de error importantes (superiores a uno o dos píxeles). Debajo del histograma se muestran indicadores para el valor promedio del error y la varianza del mismo.

■ Parámetros de configuración

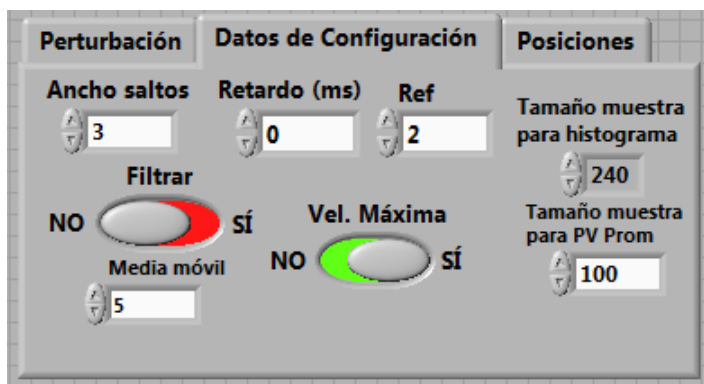


Figura 3-6.: Pestaña de configuración de parámetros

En la figura 3.6 se muestra la pestaña de configuración, que una vez desplegada permiten variar algunos parámetros que son descritos a continuación.

Para la localización de los máximos y mínimos se utiliza el control Ancho saltos, el cual es el tamaño del salto en píxeles que se usa para localizar los valores extremos del patrón. El algoritmo diseñado no encontrará mínimos que estén separados por un valor menor al establecido mediante este control; y esto evita que picos asociados con el ruido sean identificados como máximos del patrón de interferencia; claro está, si este valor es demasiado grande, el algoritmo no encontrará ningún mínimo.

A la derecha de este control se encuentra Retardo (ms), el cual puede ser utilizado para asignar un retardo específico entre capturas sucesivas de la cámara. La posibilidad de elegir este parámetro es útil para comprobar la sincronización entre captura y actuación, tal como será explicado en detalle en el próximo capítulo.

El control *Ref* es el número (ordinal) del mínimo de referencia para determinar el SP. Por defecto es el segundo mínimo, es decir que la posición del segundo mínimo en la iteración cero será el setpoint, y en todas las iteraciones sucesivas, la posición de este mínimo será la PV. El control *Filtrar* permite escoger si se desea filtrar o no el patrón de interferencia. Se trata de un filtro mediana, y la *Media móvil* es el número de muestras que se usarán para hacer el promedio de las intensidades alrededor de cada

pixel; este valor siempre es un número impar.

Debe advertirse que existen algunas configuraciones hacen que la respuesta del el sistema sea demasiado lenta, y algunas de estas configuraciones no son importantes después de encontrar los parámetros adecuados. Por ejemplo, luego de escoger la sección del perfil de intensidad del patrón de interferencia capturado por la cámara que se desea amplificar, no es vital para el sistema de control tener activada en tiempo real la posibilidad de volver a escoger otro rango distinto, y teniendo en cuenta que el valor de estos sliders sirve para ajustar el tamaño de la ventana *Selección* y que en cada iteración el algoritmo tiene que revisar sus valores y redimensionar la ventana, es preferible tener esta posibilidad desactivada cuando no sea necesario cambiar el valor de los sliders frecuentemente. Para esto se ha creado el control *Vel. Máxima*, el cual, cuando está por defecto en *Sí* deshabilita la posibilidad de cambiar con los sliders la zona del sensor de la cámara que se quiere ver amplificada en el WFG *Selección*. Si se quiere cambiar el valor de los sliders se mueve a *No* el selector de *Vel. Máxima*.

Finalmente, a la derecha de esta pestaña aparece el tamaño de muestra para el histograma de error, y el tamaño de muestra para el promedio de la PV que se muestra en el Chart como PV Prom. Debajo del *chart* Selección se muestra el periodo de las franjas, que aunque por ahora no se puede cambiar desde el computador, si se puede cambiar manualmente en el interferómetro cambiando la inclinación de uno de los haces. Se prevé la utilización de un tercer actuador en el sistema para variar a voluntad el período de las franjas mediante el computador. Esto empleando el tercer canal del controlador disponible.

■ Posiciones de máximos y mínimos

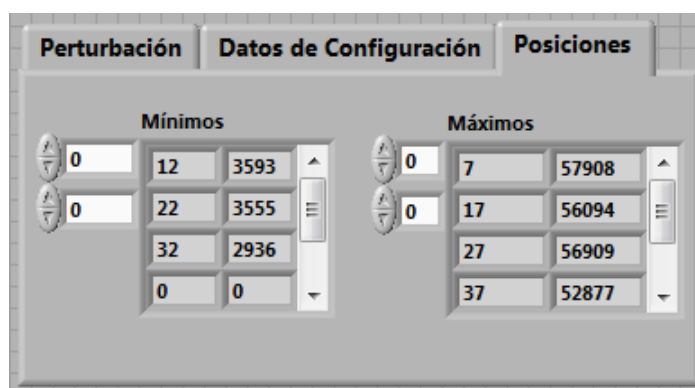


Figura 3-7.: Posiciones de máximos y mínimos

Finalmente la pestaña posiciones muestra tanto las posiciones de los máximos y mínimos encontrados en el patrón como las intensidades en estas posiciones. La primera

columna para las posiciones (en pixeles) y la segunda para las intensidades (medidas con resolución de 16 bits).

En la figura 3.7 se observa que en el momento que se tomó el pantallazo se tenían localizados tres mínimos y cuatro máximos. Cabe anotar que los puntos máximos o mínimos que se encuentren muy pegados a los bordes de la pantalla no serán identificados por el algoritmo. Esto debido a que el algoritmo de detección de extremos relativos necesita realizar detección de cambios de pendiente que se realizan por saltos ³.

■ Documentación del panel frontal y del código gráfico

Todos los controles e indicadores del panel frontal, y todos los segmentos del código G creado en labVIEWTM están detalladamente documentados. En el panel frontal se puede poner el puntero del mouse sobre cualquier control o indicador y aparece el nombre asignado a este elemento que en todos los casos, fue bautizado con un nombre referente a la función que cumple.

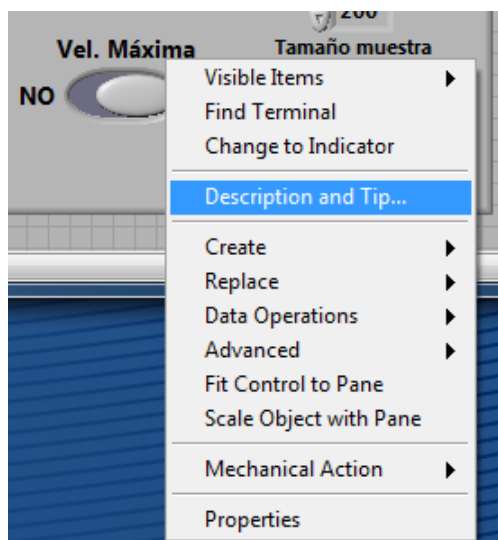


Figura 3-8.: Menú desplegable al hacer clic derecho sobre un control o indicador

Si se hace clic derecho sobre el elemento, se despliega un menú como el de la figura 3.8; al escoger la opción *Description and Tip* se abre una ventana con información adicional sobre la función de dicho elemento como la que se muestra en la figura 3.9 para el control *Vel. Máxima*.

Análogamente, el código creado, el cual será descrito en el próximo capítulo, también está documentado: específicamente, todas las secciones tienen explicaciones breves so-

³“Muy pegados al borde” debe entenderse como separados del borde una distancia en pixeles menor a dos veces el valor asignado en el control “Ancho Saltos”.

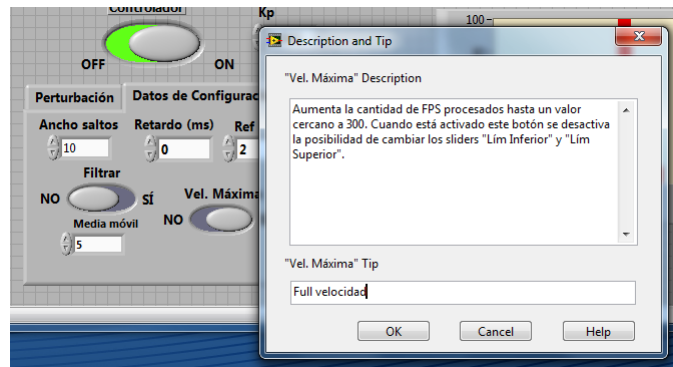


Figura 3-9.: Ventana ejemplo que se abre cuando se necesita información sobre algún control o indicador

bre las funciones que ejecutan como se observa en la figura 3.10.

De nuevo, todas las variables creadas, tienen nombres alusivos a la función que ejecutan, y las diferentes secciones del código se han separado con distintos colores. Esto hace que el código, a pesar de ser muy grande, sea agradable de observar y menos complejo de entender, incluso para quien en el futuro desee modificarlo.

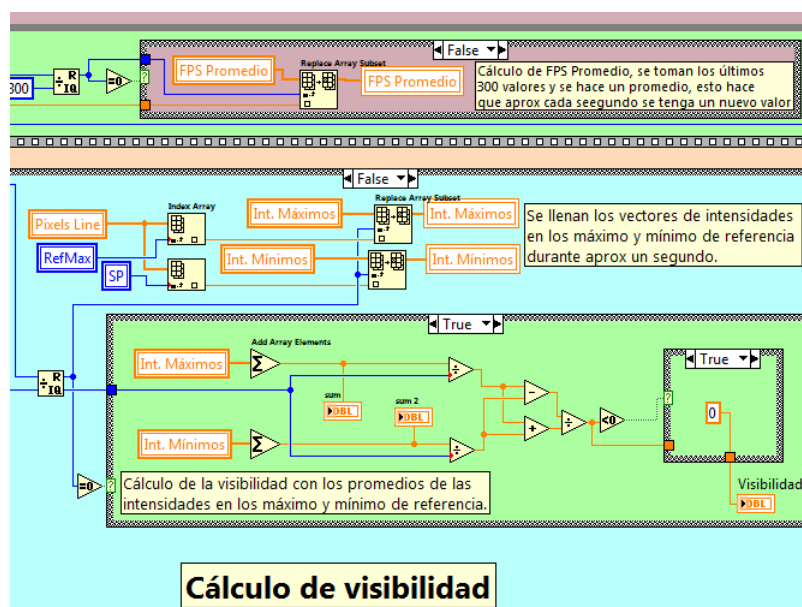


Figura 3-10.: Sección del código como ejemplo de su documentación

4. Sistema de control

Enmarcado en el objetivo principal de este proyecto, centrado en el diseño de un sistema que permita compensar las perturbaciones externas a las que se someten los experimentos de interferometría, en este capítulo se explica el proceso que se siguió para diseñar el sistema de control respectivo. En la sección 4.1 se presenta el procedimiento que se usó para la identificación del modelo del sistema. En la sección 4.2 se explica el algoritmo de control que se implementó, y finalmente en la sección 4.3 se muestra una evaluación cuantitativa del desempeño del mismo, la cual permite conocer las capacidades del sistema para compensar las diferencias de fase ocasionadas por perturbaciones externas. Finalmente en la sección 4.4 se muestra una explicación de la forma como se dio acceso remoto a la plataforma creada en labVIEWTM.

4.1. Identificación del sistema

Como se explicó en la sección 2.3.2, la identificación del sistema consiste en la construcción de un modelo matemático para el mismo, basado en un conjunto de datos de muestra de entrada y salida. Con estos datos el algoritmo de identificación conoce la respuesta del sistema ante diferentes entradas y variaciones, tanto en frecuencia como en amplitud de la señal de entrada. De esta forma, el modelo puede entonces entregar una función de transferencia (representación en frecuencia de la respuesta al impulso) que describa adecuadamente las características dinámicas del sistema. En el caso del sistema que se desea identificar, la entrada es el voltaje que se le suministra al actuador compensador, y la salida es el pixel en el que se encuentra el patrón de franjas (determinado por la posición de uno de sus mínimos). Lo primero que debe escogerse es una señal de estímulo adecuada, la cual debe contener frecuencias y amplitudes similares a las señales a las que normalmente está sometido el sistema. Para tales efectos se escogió como señal de estímulo una señal de ruido blanco gaussiano filtrado, la cual contiene saltos de amplitud variables, de la misma forma como trabajará el actuador cuando esté en el proceso de compensación. La figura 4.1 muestra la gráfica de entrada y salida del sistema, que corresponden, respectivamente, al voltaje de entrada del actuador (multiplicado por 10 para mejorar su visualización) y el pixel en el que se encuentra el patrón de franjas. La frecuencia para la señal de estímulo que se escogió es de

30Hz, la cual es adecuada teniendo presente que la frecuencia máxima de muestreo para el sensor es de aproximadamente 300Hz. Usar una frecuencia más alta para la señal de estímulo podría hacer que se presentaran efectos de aliasing, y una frecuencia más baja ocasionaría redundancia de datos, que haría más pesados los cálculos en el algoritmo de identificación (National Instruments, 2004). Para la identificación del modelo de la planta, se trabajó con el *System Identification Toolbox* de labVIEWTM, el cual requiere ingresar una tabla de datos de dos columnas, una para la entrada y otra para la salida; esto hizo necesario diseñar un instrumento virtual adicional que permitiera generar, además de la actuación y la captura de datos, un reporte en forma de hoja de cálculo. Cuando esta hoja de cálculo se ingresó al instrumento virtual diseñado para el pre-procesamiento de los datos y la identificación del sistema, se observaron algunos hechos interesantes. En primer lugar, en el diagrama de Bode (Ogata 2010) que se obtuvo, se pudo ver que la respuesta en frecuencia del sistema resultaba ser una constante para todo el rango de frecuencias de 0 a 30 Hz, lo cual, por supuesto, es ideal para los efectos de la identificación, debido a que no hay ganancias diferenciales en función de la frecuencia y el modelo resulta menos complejo. En segundo lugar, al intentar predecir el error con algunos de los criterios mencionados en la sección 2.3.2, se obtuvo un error de menos del 5 % para un modelo de orden 6; y al generar la función de transferencia con un modelo ARMAX (National Instruments 2004), el algoritmo entregó una función de transferencia en la que el numerador y el denominador son prácticamente los mismos.

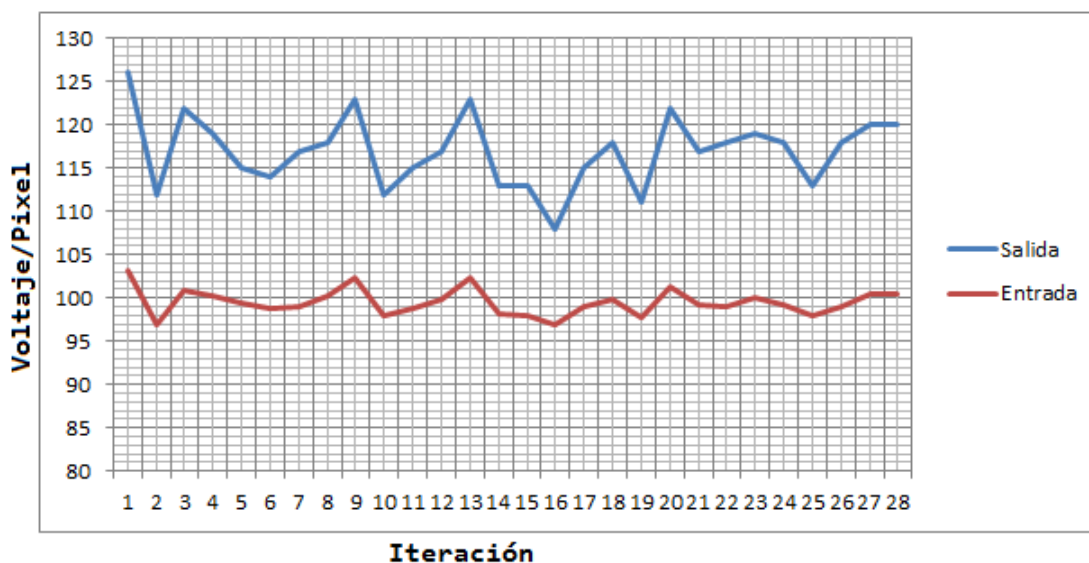


Figura 4-1.: Entrada y salida del sistema

Luego de optimizar algunos procesos que ejecutaba el algoritmo para la toma de datos de entrada y salida, y lograr una sincronización entre la actuación al sistema y la toma de datos por parte del sensor, se obtuvieron datos que permitieron un análisis más acertado

de los polinomios que entregaba el algoritmo. Mientras se depuraban más los datos, más parecidos eran los polinomios del numerador y del denominador, lo que permitió llegar a la conclusión de que el sistema del que se estaba tratando de encontrar un modelo, era un sistema estático. Este tipo de sistemas es muy atípico; no se encontraron referencias en bases de datos en relación con el diseño de sistemas de control para sistemas de esta clase, en la que el tiempo de respuesta del actuador hace que la PV se actualice en un tiempo menor que el periodo de muestreo. En la figura 4.1 puede verse que cualquier cambio en la señal de entrada para el voltaje del actuador produce un cambio (proporcional al cambio de voltaje) de manera inmediata. Puede también observarse que no hay sobre-impulso, y no hay tiempo de establecimiento; esto es, dado que este es un sistema en tiempo discreto, el hecho de que en la misma iteración en la que la entrada cambia, la salida también lo haga, y siempre en la misma proporción; significa que no hay un retardo asociado con la respuesta del sistema. Este comportamiento por supuesto es atípico, ya que en un sistema convencional, al modificar una entrada, éste siempre toma un tiempo para llevar su señal de salida al valor final, el tiempo de establecimiento, y posiblemente en el recorrido de la señal hacia su valor final se pase un poco y luego regrese al valor estacionario, presentando lo que se denomina sobre-impulso. Un examen más a fondo de las características dinámicas de los componentes del sistema explica de manera exacta la razón de este comportamiento. Recordemos que la frecuencia de muestreo que tiene la cámara que está observando el patrón de interferencia es de alrededor de 300 Hz; esto quiere decir que entre captura y captura la cámara se tarda un tiempo de aproximadamente 0.003 segundos, o 3333 microsegundos. Ahora bien, en la sección 2.3, se encontró que el slewrate del actuador piezoeléctrico es $16,7V/ms$, y dado que los cambios de voltaje a los que se somete el actuador son de 1 V como máximo, se sigue que para llegar a su posición final, en cada iteración el actuador tardará un tiempo de:

$$\frac{1}{16,7}ms = 0,06ms = 60\mu s \quad (4-1)$$

Este tiempo es mucho menor que el tiempo en que la cámara está realizando los registros. Por tanto, aunque efectivamente el actuador debe tener una dinámica, no hay manera de percibirla con los dispositivos disponibles, ya que se necesitaría una cámara que tuviera una capacidad de realizar registros con periodos inferiores a $6\mu s$, lo que equivaldría a unos 167KHz. Esto por supuesto no es un problema para los efectos de este proyecto. La cámara con la que se cuenta tiene un periodo de muestreo más que suficiente, y sus capacidades no se ven opacadas en ningún momento por el hecho de tener un actuador tan veloz. Todo lo contrario, se aprovecha el hecho de tener un actuador con una velocidad de respuesta tan alta para llegar a la conclusión de que la función de transferencia de la planta es una constante (que depende del período de las franjas de interferencia como se verá más adelante). Esto es, al llegarle una entrada al sistema, la salida será instantáneamente (para efectos prácticos) esa entrada multiplicada por una constante. Esto quiere decir, que una manera adecuada de

atacar el problema de estabilización de franjas, con la instrumentación actual, es mediante un controlador proporcional cuya constante está relacionada con la longitud de onda de la luz empleada y con el valor que hay que asignarle a la entrada del actuador para producir un desfase que compense el error ($SP - PV$) en tiempo real.

4.1.1. Constante proporcional

Un movimiento ΔX en el actuador en uno de los brazos del Mach-Zehnder produce un cambio en la longitud de camino óptico que recorre la luz en ese brazo de $\sqrt{2}\Delta X$. Entonces, para mover el patrón de interferencia un periodo espacial completo, el actuador debe moverse $\lambda/\sqrt{2} = 0,6328\mu m/\sqrt{2} = 0,4475\mu m$. El actuador empleado recorre $20\mu m$ cuando el voltaje cambia de 0 V a 75 V. Lo que quiere decir que para mover el patrón 1λ el voltaje debe cambiar en:

$$0,4475\mu m \times \frac{75V}{20\mu m} = 1,68V \quad (4-2)$$

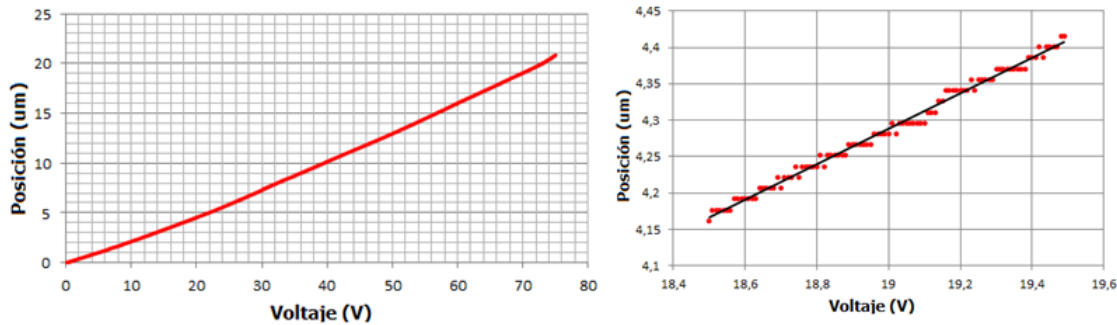


Figura 4-2.: Respuesta del actuador. A la izquierda para todo el viaje, a la derecha para la zona en la que se le exige que se mueva en este proyecto

Aunque usando la ganancia teórica se obtiene el valor dado en la ecuación 4-2, se realizó el cálculo de la ganancia, no con los datos para el viaje completo ($20\mu m$ para $75V$), sino con la ganancia dada en la zona en la que el actuador se mueve, a saber, alrededor de los 19V (Ver figura 4.2 derecha). Tanto de manera analítica con los datos de ganancia, como experimentalmente se encontró que el valor exacto para este sistema es de 1.87 V.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propuso que una constante proporcional adecuada para el controlador dependerá solo del periodo espacial de las franjas siguiendo la ecuación:

$$K_p = \frac{1,87}{periododelasfranjas} \quad (4-3)$$

Una constante mayor producirá movimientos demasiado bruscos y una constante menor sería

ineficiente ya que el controlador requeriría de varias iteraciones para realizar la compensación de un desfase.

4.2. Algoritmo de control

Llegado al núcleo del proyecto, a saber, el diseño del sistema de control, se tratarán en esta sección los aspectos técnicos que se tuvieron presentes para el diseño del mismo. En primer lugar, se presentará el tema de sincronización en la sección 4.2.1, donde se explica la importancia que tiene en este sistema en lazo cerrado la sincronía entre la captura de datos, el procesamiento y la actuación; además se mencionarán los aspectos técnicos de la cámara y el actuador usado, que fueron tenidos en cuenta para lograr el objetivo de tener un sistema síncrono. En la sección 4.2.2 se muestra el diagrama general del algoritmo implementado, en el que se muestran y explican las funciones de las seis secciones en las que está dividido el código desarrollado y se explica cómo se logró la sincronía entre las distintas etapas o secciones, tanto para el control adecuado de la variable procesada como para la generación de un reporte exacto de los datos de cada iteración en una hoja de cálculo.

4.2.1. Sincronización

Uno de los problemas de mayor exigencia desde el punto de vista técnico, en la implementación del sistema de control, fue lograr la sincronía entre los distintos procesos que se manejan en el algoritmo. Por un lado, la cámara tiene que tomar un frame cada 3 ms y entregar al algoritmo el vector con las 2048 intensidades de 16 bits en cada uno de los píxeles, y para cada frame se debe hacer un proceso ineludible en cada iteración, a saber, encontrar las posiciones de los máximos y los mínimos de intensidad, valores con los cuales se debe calcular tanto el periodo espacial de las franjas y la visibilidad del patrón, como el error respecto a un setpoint previamente guardado en la primera iteración. Por otro lado, se debe calcular la señal de compensación que se envía al actuador compensador y enviarla al puerto USB al que está conectado el driver de dicho actuador. Todo esto debe hacerse sin permitirle a la cámara que envíe otro vector con el siguiente frame.

Paralelo con este proceso se produce la perturbación del sistema, que adrede se ingresa al interferómetro por medio del actuador perturbador; esta perturbación se escoge entre un grupo de señales convencionales desde la interface de usuario, y el algoritmo calcula los valores de voltaje enviados por medio de la interface RS-232, a la que también está conectado el driver que controla al actuador perturbador. Esta perturbación no tiene que estar necesariamente realizándose en serie con el resto del proceso, dado que se introducen perturbaciones desco-

nocidas desde fuera del interferómetro y el sistema de control propiamente dicho, tal como ocurre cuando estas perturbaciones provienen de vibraciones externas, gradientes térmicos, entre otras casusas. No obstante, la sincronización en la captura y envío de los datos asociados con el valor instantáneo de la perturbación introducida en el sistema fue considerada con el fin de generar un buen reporte de todos los datos.

Debido a que las variables están cambiando tan rápidamente, y que en algunos casos toman valores por defecto que se actualizan en la misma iteración o en iteraciones subsiguientes, se tuvo especial cuidado en la lectura de las variables para la generación de los reportes, teniendo muy presente que estas coincidieran con datos que se conocían de antemano; en consecuencia, se realizaron pruebas con frecuencias de muestreo muy bajas, hasta de 0.5 FPS, con el fin de corroborar la correspondencia de las variables mostradas por el algoritmo en pantalla, y asimismo entre estas y las que se envían al reporte en la hoja de cálculo. Esto garantiza que las variables locales de todo el algoritmo, en todo momento sean los valores reales de cada iteración, y no los valores asignados por defecto, o valores guardados en memoria (posiblemente asociados con una iteración anterior).

Hubo una apropiación de conocimiento sobre el manejo de la cámara lineal con la que se trabajó, que implicó renunciar a su modo más rápido de operación, a saber, el modo de captura continua. En este modo de operación, una vez realizadas las capturas de cada frame, la cámara envía al buffer los datos para su procesamiento, pero antes de hacerlo, empieza con la captura del siguiente frame y en consecuencia, de no haberse corregido, el patrón observado en cada instante sería el de tres iteraciones anteriores, no el actual. Esta es una ventaja en la medida en que aumenta la cantidad de frames por segundo registrados, pero representa un problema en tanto obra en detrimento de la sincronía para sistemas en lazo cerrado, como es el caso en este proyecto. Se optó entonces, después de muchas consultas con el fabricante, por utilizar el modo de operación de captura simple, el cual realiza de manera serial la captura y el envío de los datos, sin tomar el siguiente frame hasta no haber procesado y enviado por parte del driver los datos al software.

Finalmente, se observó que los actuadores piezoeléctricos responden de manera muy exacta incluso para anchos de banda de 300Hz, y que su histéresis es despreciable en el rango de desplazamientos requeridos para la compensación de fase. Para desplazamientos de decenas de micras este efecto cobra relevancia.

4.2.2. Diagrama de bloques

La versión definitiva del software tiene la estructura que se muestra en la figura 4.3. La parte superior y más compleja del algoritmo consiste en un ciclo while repetitivo de cuatro bloques o secciones que se ejecutan de manera serial con un contador i que inicia en cero y aumenta

en uno en cada iteración del ciclo. El primer bloque solo se ejecuta en $i = 0$, esto es, en la primera iteración, y permite la configuración de valores iniciales para el algoritmo, incluido el más importante, que es la asignación del voltaje al actuador compensador que lo lleva a la mitad de su viaje máximo, permitiendo que se mueva con la mayor amplitud posible, en ambas direcciones, cuando esté ejecutándose el control. Otros datos que se inicializan en este frame son el historial de las gráficas, para que inicien en blanco, y la asignación de “false.” al selector del controlador, para que inicie apagado.

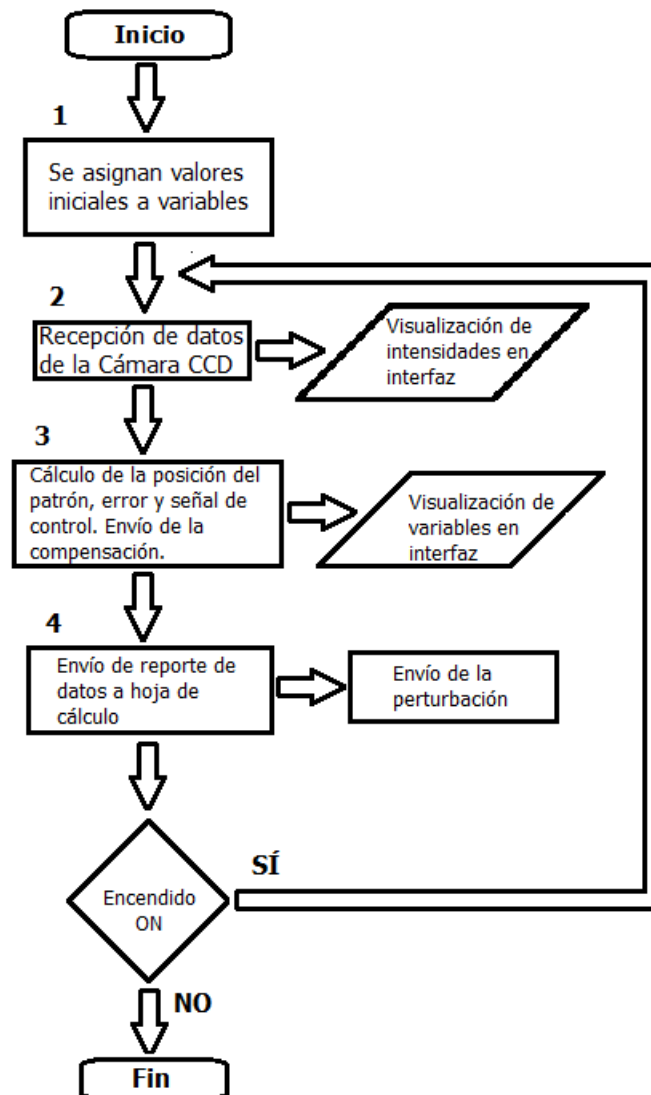


Figura 4-3.: Estructura general del algoritmo

El segundo bloque tiene las herramientas que permiten recibir el vector de intensidades que provienen del driver de la cámara. Este vector se grafica en un Waveform Graph, y por medio de un par de controles se puede hacer una ampliación de una zona de esta gráfica que se

muestra en otra gráfica. Las gráficas tienen la posibilidad de filtrarse para suprimir ruido por medio de un filtro FIR que también se ejecuta en este bloque.

En el tercer bloque se ubican todos los máximos y mínimos del patrón. El algoritmo detecta los cambios en el signo de la pendiente de la gráfica Intensidad Vs Pixel, para encontrar las zonas donde se encuentran los extremos relativos, y luego en esta zona busca el mínimo o máximo de intensidad para llenar una matriz de $n \times 2$ con las posiciones y las intensidades de los extremos, donde n es el número de extremos que encuentra. También se calcula periodo espacial de las franjas, restando las posiciones de los mínimos (o máximos) consecutivos. En la primera iteración ($i = 0$) se asigna por defecto el Setpoint como la posición en la que se encuentra el segundo mínimo, y en cualquier otra iteración se calcula la visibilidad del patrón, tomando como base los valores promedio de las intensidades medidas en el Setpoint y en un máximo consecutivo elegido por defecto como el máximo que se encuentra a la derecha del Setpoint. Debe tenerse en cuenta que los promedios de las intensidades en estos dos puntos del patrón de franjas se realizan con base en los datos registrados durante un tiempo mayor al período de las perturbaciones de menor frecuencia introducidas en el sistema. No obstante, el valor de la visibilidad así calculado se refresca periódicamente, incluyendo los nuevos registros y descartando los más viejos. Conviene notar que, puesto que el tiempo de captura de la cámara es muy pequeño en relación con los períodos de las perturbaciones introducidas en nuestro sistema, la visibilidad *instantánea* del patrón, es decir, la visibilidad del patrón correspondiente a cada ciclo de captura de la cámara puede alcanzar valores muy altos o llegar a ser igual a la unidad. Esto porque en el interferómetro la intensidad de los haces ha sido compensada, y el ruido en las franjas minimizado. No obstante, el cálculo de la visibilidad a partir de los promedios de las intensidades en dos lugares fijos, correspondientes a las posiciones del mínimo que se establece como setpoint y un máximo consecutivo en el instante cero, emula el resultado de la visibilidad que sería obtenida en un registro realizado durante un tiempo grande en comparación con el máximo período de las perturbaciones introducidas en el sistema. Finalmente en este mismo bloque se calcula en primer lugar el error (SP-PV) y la señal de control por medio del producto entre el error en pixeles y la constante proporcional. Esta señal de control se envía al actuador piezoeléctrico compensador vía USB. También en esta sección de código se grafica el histograma del error y se calcula tanto la media como la varianza del mismo. En esta señal también se toman aproximadamente durante un segundo, los datos de error para realizar los cálculos estadísticos. Las escalas de este histograma se configuran cada segundo aproximadamente para que el gráfico siempre muestre la parte representativa del mismo.

En el cuarto y último bloque se toman siete variables para hacer el reporte de ellas en cada iteración, a saber, el número de la iteración, el voltaje de perturbación, el setpoint (SP), la posición del patrón (PV), el error, el voltaje de compensación y el tiempo de iteración. Cuatro de estas variables se toman en cada iteración para realizar, en tiempo real, el gráfico

de visualización para el usuario. De manera paralela e independiente a este ciclo de 4 bloques, se ejecuta un ciclo que configura el puerto serial y calcula el voltaje que se envía al actuador perturbador. El algoritmo permite escoger entre un grupo de señales convencionales para perturbar el patrón, con perfiles senoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra y chirp; señales a las que se pueden ajustar tanto la frecuencia como la amplitud. El ciclo principal de toma de datos, compuesto por cinco secciones, en cada iteración mide el tiempo que demora ejecutando los cinco bloques, para presentar al usuario el valor de FPS. Este valor está sujeto principalmente, no a la cantidad de cálculos que se hacen por iteración, sino a la velocidad que tiene la cámara para tomar cada imagen y enviarla al algoritmo.

4.3. Evaluación de desempeño

Para evaluar la capacidad del sistema de control para compensar perturbaciones externas, adrede se ingresará al interferómetro un movimiento horizontal sinusoidal en el espejo de uno de sus brazos, vía el actuador perturbador. Al espejo moverse horizontalmente de manera oscilatoria, el patrón de interferencia mostrado tanto en la pantalla del interferómetro como en la interface de usuario, se mueve también con la misma frecuencia y con una amplitud proporcional a la amplitud en voltios de la oscilación que se ingresa al actuador. Este movimiento oscilatorio tiene la opción de ajustar, desde la interface de usuario, tanto la frecuencia como la amplitud de la oscilación; de esta manera se puede analizar el desempeño del sistema de control, o su capacidad para compensar oscilaciones del patrón sin conocimiento a-priori acerca de sus características.

Una caracterización en rigor del desempeño debería extenderse al análisis de la respuesta del sistema frente a perturbaciones más complejas, resultado de la superposición de señales de distinta amplitud y frecuencia, incluso frente a perturbaciones completamente aleatorias; no obstante, la observación de la respuesta frente a señales elementales permite comprender el rol e importancia de las distintas variables que condicionan la respuesta del sistema. Asimismo, bajo la hipótesis de la linealidad del interferómetro (donde la entrada es la señal de perturbación y la salida es el pixel donde está ubicado el patrón), su respuesta frente a perturbaciones más complejas podría sintetizarse mediante la superposición de las respuestas conocidas frente a estas señales elementales, en un rango de frecuencia y amplitud determinados, usando el principio de superposición.

Un resultado típico para el comportamiento del actuador se presenta en la figura 4.4, en la que se grafica la posición del patrón (PV) en función del tiempo, cuando se perturba el sistema con una señal senoidal. Hasta el segundo 0.56 el actuador perturbador está haciendo que el patrón oscile alrededor del pixel 23 con un error de ± 4 o 5 pixeles. Cuando se enciende el controlador, a pesar de que la señal perturbadora sigue actuando sobre el sistema, ahora

la PV oscila alrededor del setpoint con un error de no más de ± 2 píxeles ($28\mu m$).

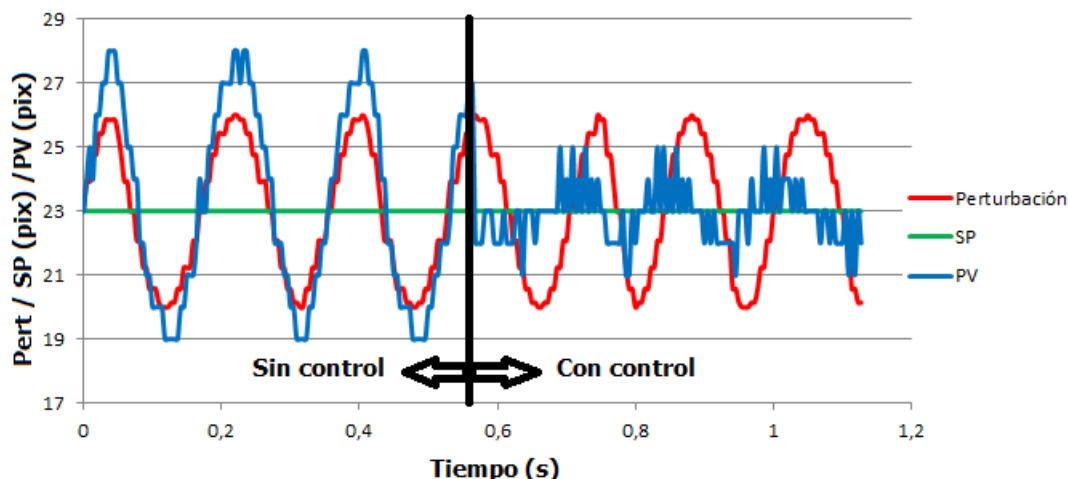


Figura 4-4.: Posición del patrón (PV) alrededor del setpoint (SP) frente a una perturbación, sin control (de 0 a 0.56 s) y con control (de 0.56 a 1.1 s) para una PVmax con control de ± 2 píxeles

Sin embargo, no basta con esta observación de la evolución de la señal PV en función del tiempo para determinar la capacidad del controlador de compensar diferencias de fase, debido a que no se aprecia a simple vista en esta gráfica la cantidad de tiempo que la señal PV permanece en el SP, por lo que se ha graficado en la figura 4.5 los histogramas del error cuando el controlador no está activo (histograma de la izquierda) y cuando el controlador está activo (histograma de la derecha). Se puede apreciar que para este caso en particular, que corresponde a una señal de perturbación cuya frecuencia es 6 Hz, mediante el sistema de control se logra reducir la oscilación del patrón alrededor del SP a ± 2 píxeles.

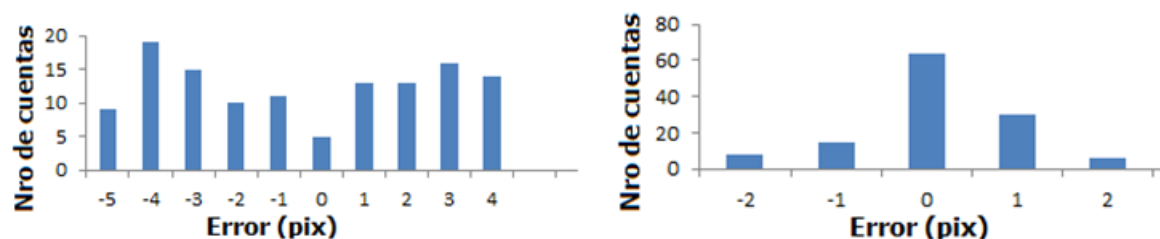


Figura 4-5.: Histogramas de la señal de error sin control (izquierda) y con control (derecha) para una PVmáx con control de ± 2 píxeles

Sin embargo, cuando la frecuencia de la señal de perturbación se reduce a 2 Hz, manteniendo los demás parámetros inalterados, el controlador es puede llevar la señal PV a una oscilación de ± 1 píxel alrededor del SP, tal como se aprecia en la figura 4.6 a partir del segundo 1.0.

Estas variaciones se hacen más frecuentes cerca de los lugares en que la velocidad de la perturbación tiene (en valor absoluto) un máximo, es decir, a mitad de camino entre los máximos y los mínimos de la perturbación.

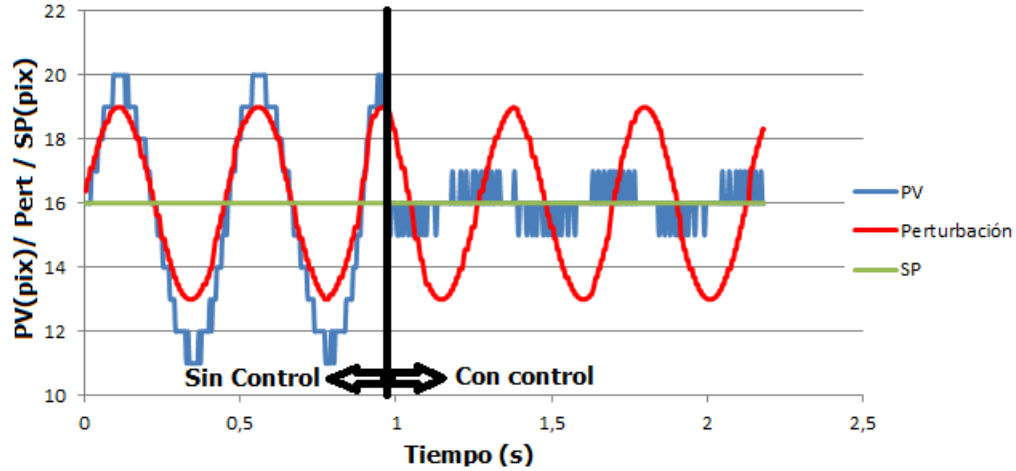


Figura 4-6.: Posición del patrón (PV) alrededor del setpoint (SP) frente a una perturbación, sin control(de 0 a 0.96 s) y con control(de 0.96 en adelante) para una $PV_{\text{máx}}$ con control de ± 1 pixel

En este caso (ver figura 4.7) el histograma de la señal sin control es similar al de la figura 4.5, pero el histograma de la derecha correspondiente a la señal con control, muestra una distribución del error con una varianza menor. Esto debido a que esta prueba (figuras 4.6 y 4.7) se hizo con una frecuencia más baja en comparación con la prueba mostrada en la figuras 4.4 y 4.5, lo que conduce a que las variaciones de la posición del patrón estén asociadas con una velocidad máxima menor, y por ende, que el controlador pueda compensar las diferencias de fase de manera más óptima. Los histogramas de las señales de error sin control muestran que el sistema de franjas permanece más tiempo cerca de los extremos de la oscilación y que por tanto se realicen más medidas en estas posiciones, dado que allí la velocidad con la cual se desplaza el patrón se reduce (las señales senoidales tienen menor variación por unidad de tiempo cerca de los valles y las crestas de la onda). Por su parte, los histogramas de las señales de error con control ponen en evidencia que, una vez comienza a actuar el sistema de control, las franjas permanecen mucho más tiempo cerca del SP, correspondiéndose con un mayor número de medidas en esa posición, en relación con las medidas tomadas fuera del SP.

Por lo dicho anteriormente, se hace necesario cuantificar el tiempo en que la señal PV se mantiene en el SP, para lo que en cada instante de tiempo, el sistema de control calcula la varianza del error para los últimos 240 frames, la cual es un indicativo de qué tan ancho es el histograma del error mostrado en las figura 4.5 y 4.7. Una gráfica ampliada de un periodo completo de la señal PV en la figura 4.6 es la que se muestra en la figura 4.8, donde se aprecia

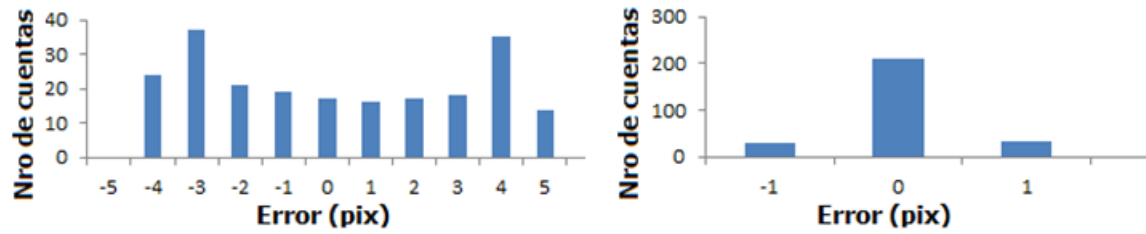


Figura 4-7.: Histogramas de la señal de error sin control (izquierda) y con control (derecha) para una $PV_{\text{máx}}$ con control de ± 1 pixel

que en la mayoría de los instantes de tiempo discreto graficados, la señal PV se encuentra en el SP (pixel 16) a pesar de que a simple vista en la figura 4.8 se observaba una señal PV distribuida muy uniformemente entre el SP y un error de ± 1 pixel.

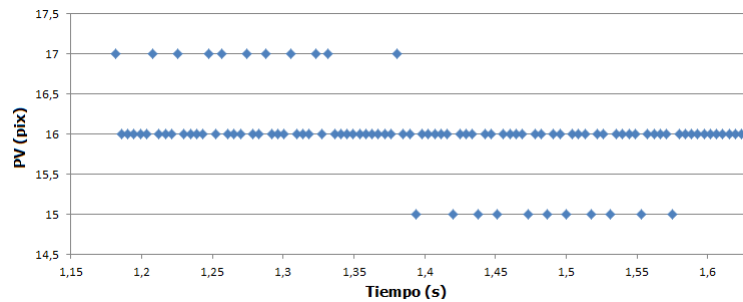


Figura 4-8.: Señal PV con control (Zoom en la figura 4.6)

A continuación se muestran las gráficas de la varianza del error y la visibilidad del patrón en función de la frecuencia y en función de la amplitud de la señal de perturbación. Cuando el controlador está apagado, la varianza tiene un valor muy elevado en comparación con el valor que tiene con el controlador encendido. A modo de ilustración en la figura 4.9 se muestra la varianza en función de la amplitud de la perturbación para una frecuencia de 2Hz.

Cuando el controlador está apagado, el valor de visibilidad es muy cercano a cero o cero para todos los valores de amplitud. Ahora bien, cuando el controlador está activo, un resultado deseable es tener una visibilidad cercana a uno y una varianza del error baja. En el primer experimento, siendo el período espacial de las franjas del 10 pixeles, se introdujo en el actuador perturbador una señal senoidal adecuada para producir un movimiento oscilatorio del patrón con una frecuencia de 1, 2 y 4 Hz, y se graficó tanto la varianza (Figura 4.10 izquierda) como la visibilidad (Figura 4.10 derecha) para variaciones de amplitud en el rango de 1pixel a 10 pixeles.

La varianza aumenta cuadráticamente con el aumento de la amplitud de la señal de perturbación. Cuando la frecuencia de la señal de perturbación es baja (línea azul de la figura 4.10

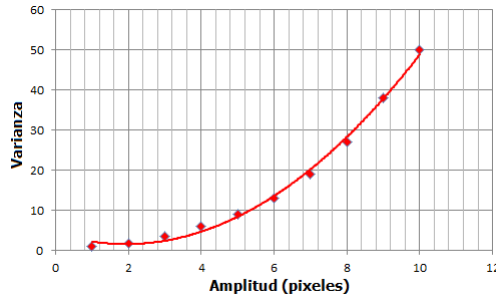


Figura 4-9.: Varianza del error para una frecuencia de 2Hz con el controlador apagado

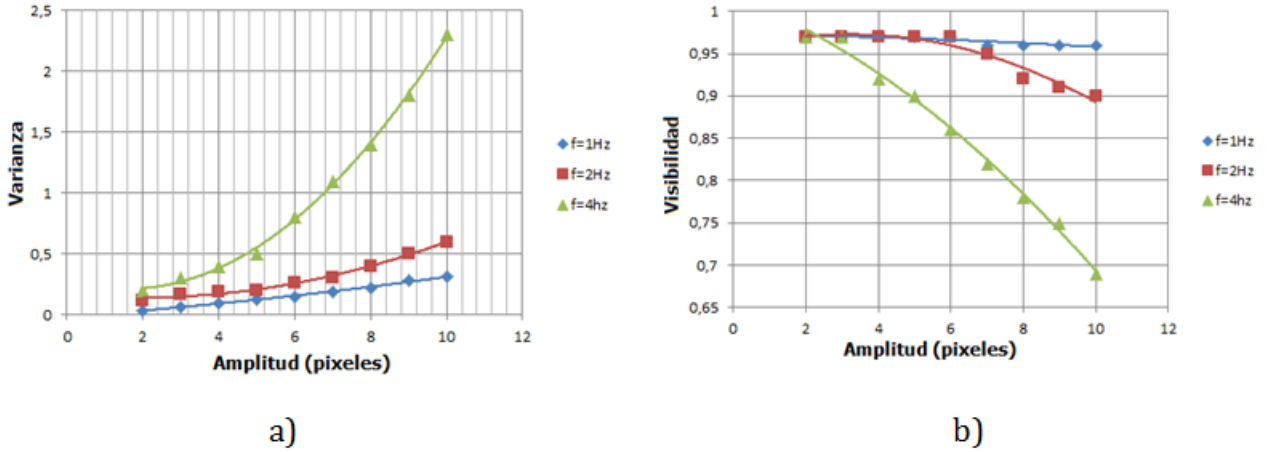


Figura 4-10.: En a) Varianza del error y en b) Visibilidad del patrón Vs Amplitud de la señal de perturbación para tres frecuencias distintas

izquierda), el aumento de la varianza con la amplitud de la señal de perturbación es mucho menor que cuando se tiene una frecuencia más alta (línea verde de la figura 4.10 izquierda). Esto se entiende teniendo presente que al ser la señal de perturbación en función del tiempo de la forma $x = A \sin \omega t$, su velocidad máxima es proporcional tanto a la frecuencia como a la amplitud. Una velocidad mayor en la señal PV hará que, entre frames consecutivos tomados sucesivamente por la cámara, las variaciones de esta señal sean mayores; esto a su vez implica una mayor exigencia en relación con el desempeño del sistema de control, a fin de que las compensaciones de fase que envíe el controlador al actuador compensador sean las más adecuadas.

La visibilidad del patrón también presenta un comportamiento muy regular. A medida que aumenta la frecuencia, la visibilidad disminuye (cuadráticamente) debido precisamente a que el patrón de interferencia se encuentra por fuera del SP durante más tiempo. Esta disminución se hace más notoria a medida que la amplitud de la perturbación aumenta (figura 4.10 derecha), debido a que en cada oscilación, el patrón se aleja cada vez más del

SP.

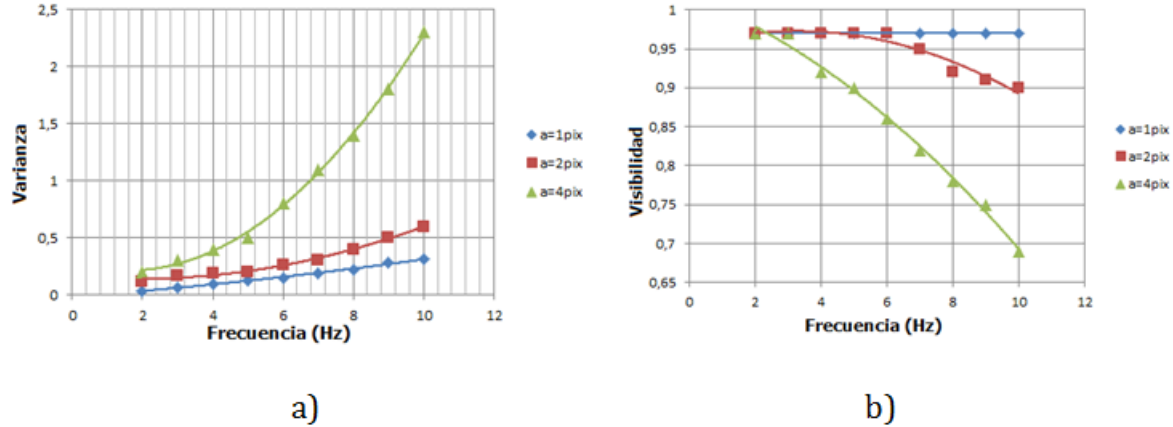


Figura 4-11.: En a) Varianza del error y en b) Visibilidad el patrón Vs Frecuencia de la señal de perturbación para tres amplitudes distintas

Al realizar las mediciones de varianza y visibilidad en función de la frecuencia para tres diferentes amplitudes (Figura 4.11), se encontraron comportamientos prácticamente idénticos a los obtenidos cuando la variable independiente era la amplitud de la señal de perturbación. Esto debido a lo que ya se mencionó, a saber, que la velocidad de una señal senoidal es proporcional tanto a la amplitud de la señal como a la frecuencia. Variar en la misma proporción, ya sea la amplitud o la frecuencia conducirá a un comportamiento equivalente del controlador cuando está compensando las diferencias de fase producidas por la perturbación. Teniendo en cuenta lo anterior, se han graficado tanto la varianza del error (figura 4.12) como la visibilidad del patrón (figura 4.13) en función del producto Amplitud de la señal de perturbación por su frecuencia. Para cada producto de $A \cdot f$, se grafican tanto la varianza como la visibilidad para distintas combinaciones. Por ejemplo, para $A \cdot f = 6$ se tomaron las siguientes combinaciones y se ubicó el resultado con un marcador distinto $A=1$ pix, $f=6$ Hz (cuadrado rojo); $A=2$ pix, $f=3$ Hz (rombo azul); $A=3$ pix, $f=2$ Hz (triángulo verde) y $A=6$ pix, $f=1$ Hz (asterisco verde).

En la mayoría de los casos todos estos marcadores están montados sobre un mismo lugar, lo que resalta algo que ya se mencionó, a saber, que la capacidad del controlador para compensar diferencias de fase, está determinada en este caso por la variable que es el producto de la amplitud y la frecuencia de la señal de perturbación.

Para la visibilidad se hizo un tratamiento similar, y se encontró un comportamiento cuadrático negativo con el aumento de $A \cdot f$, en ambos casos, Varianza Vs $A \cdot f$ y Visibilidad Vs $A \cdot f$, y se graficó la línea de tendencia con los valores promedio de las ubicaciones de los distintos marcadores. Al encontrar la ecuación de esta línea se notó, como era de esperarse, que el valor de la varianza es aproximadamente cero cuando el producto de $A \cdot f$ es igual a

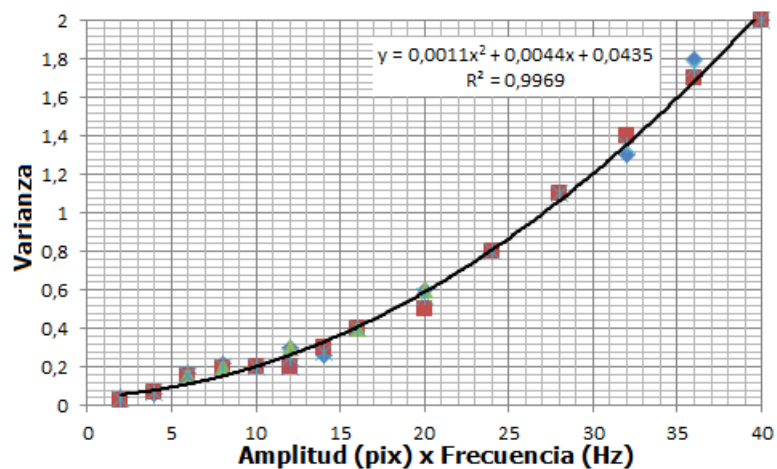


Figura 4-12.: Varianza del error Vs el producto de amplitud y frecuencia de la señal de perturbación

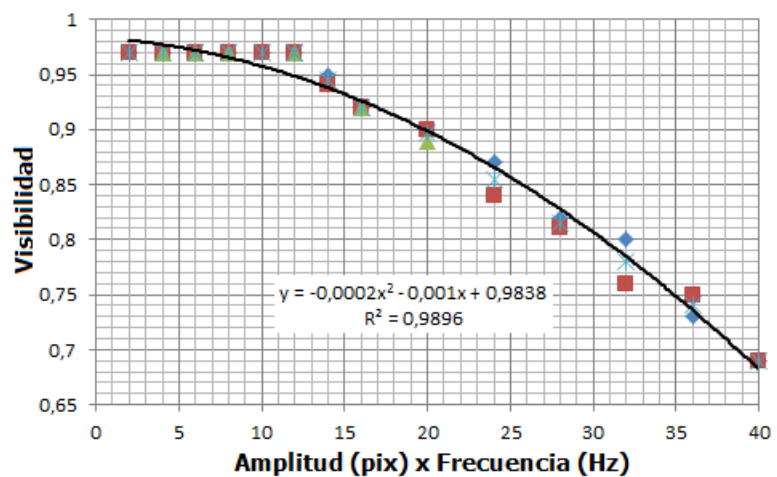


Figura 4-13.: Visibilidad del patrón Vs el producto de amplitud y frecuencia de la señal de perturbación

cero, es decir, cuando el patrón no se ha perturbado. Similarmente, bajo estas condiciones la visibilidad tiende a su valor límite, esto es, a la unidad.

4.4. Acceso remoto

Utilizando labVIEW, permitir el acceso remoto a un instrumento virtual es relativamente sencillo. En primer lugar se debe configurar el PC donde se encuentra el instrumento virtual como un servidor, para ello se deben activar las reglas de Firewall de windows para permitir el acceso a los puertos 80 y 3363 tanto TCP como UDP.

Ahora bien, desde labVIEW se puede crear una página web que contenga el instrumento virtual (VI) usando la herramienta “Web Publishing Tool”. De esta forma se puede acceder a todas las características del instrumento virtual solamente conectándose a una página web. En esta caso, el instrumento virtual amplió características de la página web con la que cuenta la universidad EAFIT para laboratorios remotos <http://weblab.dis.eafit.edu.co/>

Desde cualquier computador aunque no tenga instalado labVIEW, instalando la herramienta gratuita “LabVIEW Run-time Engine” se puede ejecutar el VI usando Internet Explorer previo pedido de cita a los administradores.

5. Conclusiones

- Se implementó un interferómetro Mach-Zehnder, empleando un haz láser colimado como fuente de iluminación y con la posibilidad de modificar la longitud de camino óptico en cada uno de los brazos independientemente, empleando para el efecto, dos actuadores piezoeléctricos de alta resolución, controlados simultáneamente mediante el computador, permitiendo de este modo introducir una perturbación en un brazo y compensarla en el otro.
- Se diseñó e implementó un sistema activo de estabilización de franjas interferométricas que puede ser utilizado para mejorar la visibilidad de un registro de franjas, y se evaluó la capacidad del sistema para compensar las diferencias de fase producidas mediante perturbaciones externas caracterizadas por una oscilación del patrón de franjas, con perfiles, frecuencias y amplitudes conocidas.
- Se diseñó e implementó un instrumento virtual en labVIEWTM que recibe vía USB, los datos del patrón de interferencia tomados por una cámara lineal. El algoritmo envía una señal de perturbación a un actuador en el interferómetro vía RS232, detecta la posición de cada uno de los máximos y los mínimos del patrón, calcula la señal de error y finalmente calcula y envía la señal de control a un actuador vía una tarjeta de adquisición de datos conectada al PC por USB.
- Debido a la alta velocidad en la respuesta (Slewrate) del actuador implementado (PAS005 de Thorlabs), el sistema compuesto por el interferómetro Mach-Zehnder, la cámara y los actuadores se identificó como un sistema sin dinámica, esto es, las señales de control enviadas al sistema desde el controlador demoran menos de una iteración en establecer el nuevo valor de la variable procesada, y por lo tanto, hacen que la función de transferencia del sistema sea una constante dada por la longitud de onda de la luz empleada, el periodo espacial de las franjas y la ganancia del actuador.
- Se implementó un controlador proporcional cuya constante es el inverso de la función de transferencia del sistema. Usando esta constante, el controlador diseñado es capaz de llevar el patrón de interferencia a la posición del setpoint en un tiempo inferior a un periodo de muestreo dado por la cámara.

- Se generaron los protocolos y se diseñaron los algoritmos necesarios para que el sistema de estabilización implementado pueda ser controlador remotamente a través de la plataforma de laboratorios remotos de EAFIT, conectada a la red RENATA. Asimismo, se diseñó y se puso a disposición en la red un experimento orientado al área de control, para que los usuarios remotos puedan operar el sistema y entender los principios básicos del control involucrados.
- La capacidad del sistema de control para compensar diferencias de fase producidas por perturbaciones externas se evaluó calculando, tanto la visibilidad del patrón resultante, como la varianza de la señal de error. Se encontró que un aumento en la frecuencia o en la amplitud de la señal de perturbación produce, en cada caso, tanto una disminución de la visibilidad del patrón como un aumento de la varianza del error. Tanto la disminución de la visibilidad como el aumento de la varianza, en función de la frecuencia, la amplitud, y el producto de estas dos variables, se ajustan adecuadamente a la forma de una función cuadrática. Por lo tanto la capacidad del controlador para compensar diferencias de fase disminuye conforme aumenta el producto de la amplitud y la frecuencia en la señal de perturbación.
- La visibilidad medida por el sistema implementado toma como base los valores promedio de las intensidades medidas en el Setpoint y en un máximo consecutivo elegido por defecto como el máximo que se encuentra a la derecha del Setpoint. Este cálculo emula el resultado de la visibilidad que sería obtenida en un registro realizado durante un tiempo múltiplo del período de las perturbaciones introducidas en el sistema.
- El sistema de control compensa diferencias de fase producidas por perturbaciones con perfil senoidal que de no ser compensadas disminuirían el valor de visibilidad hasta cero. Para productos de amplitud de la perturbación por frecuencia de hasta $10\pi \text{ix} \cdot \text{Hz}$ el controlador lleva la visibilidad desde cero hasta un valor de 0.98, y a medida que el producto de amplitud por frecuencia aumenta, la visibilidad decrece cuadráticamente hasta un valor cercano a 0.7 cuando $a \cdot f = 40\pi \text{ix} \cdot \text{Hz}$.
- La capacidad del sistema de control diseñado para compensar diferencias de fase producidas por perturbaciones externas está limitada por el dispositivo o subsistema menos veloz, que en este caso particular resultó ser la cámara lineal empleada, la cual en su configuración de captura simple tiene una frecuencia de muestreo de alrededor de 240 fps. Emplear una cámara con una tasa de muestreo más alta, aprovecharía la velocidad del algoritmo implementado en labVIEW y la velocidad de respuesta del actuador compensador.
- La evaluación de desempeño realizada con perturbaciones de perfil senoidal puede ser empleada para evaluar el desempeño del sistema frente a perturbaciones más complejas,

teniendo presente que una función periódica se puede descomponer como la suma infinita de funciones senoidales más simples por medio de series de Fourier. Utilizando el principio de superposición se puede estimar la respuesta del sistema ante la suma de varias entradas como la suma de las respuestas individuales de cada entrada.

- Los mejores resultados que se obtuvieron, en cuanto a estabilidad del patrón de franjas, fueron posiciones del patrón de interferencia con un error de $\pm 14\mu m$ (tamaño del pixel de la cámara CCD). Este resultado podría mejorarse si a futuro se implementa en el algoritmo un sistema de detección de posición con precisión subpixel. El tamaño del pixel ($14\mu m$) no sería entonces la limitación para la resolución debido a que la posición del patrón ahora no sería una señal discreta dada por la ubicación de cada pixel de la cámara.
- Una manera alternativa y de menor costo para atacar el problema de estabilización de franjas sería utilizar como sensor no un dispositivo digital como una cámara CCD sino dispositivos con respuesta continua en el tiempo, tales como fotodiodos. Aunque esto implicaría una mayor instrumentación electrónica para la detección de las intensidades y posiciones del patrón de interferencia, tendría la ventaja de que la tasa de muestreo se podría aumentar considerablemente desde el software para aumentar la velocidad de respuesta del controlador.
- Al interferómetro implementado se le pueden adicionar nuevas variables que pueden ser controladas remotamente, añadiendo un tercer actuador que cambie la inclinación del haz de luz en uno de los brazos de interferómetro, de tal forma que desde el computador se pueda modificar el periodo espacial de las franjas.
- A futuro se pueden aumentar las capacidades de la plataforma creada en labVIEW haciendo disponible remotamente la posibilidad de implementar diversos sistemas de control. Podría verse entonces este instrumento virtual como una plataforma de pruebas y enseñanza de principios del control electrónico, tanto de manera presencial como remota.
- Incluyendo un módulo de simulación de experimentos al instrumento virtual creado, la plataforma implementada en labVIEWTM quedaría enmarcada en el nuevo modelo de educación experimental en laboratorios llamado TriLab (Abdulwahed, 2008). De manera presencial, un experimentador tendría la posibilidad de hacer los experimentos que podrían ser ejecutados de manera remota desde la red RENATA, pero a la vez, sin tener contacto con los equipos, un experimentador remoto podría hacer simulaciones y pruebas diversas sin estar conectado a la red para adquirir experiencia en el manejo de la plataforma antes de enfrentarse al uso de los equipos.

6. Bibliografía

ABDULWAHED, M., NAGY, Z. K. “The TriLab , a Novel View of Laboratory Education”. Innovation, Good Practice and Research in Engineering Education, 1-13.(2008)

AMICK H., GENDREAU M., Busch T. “Envolving criteria for research facilities: I-Vibration”, Reprinted from Proceedings of SPIE Conference 5933: Buildings for Nanoscale research and Beyond, San Diego, CA, 31 Jul 2005 to Aug 2005. Pp 1-13. 2005.

ARROYAVE, M. VELÁSQUEZ, A. OLARTE, T. MONTOYA, J. “Laboratorios remotos: Diversos escenarios de trabajo”. Revista Disertaciones. Vol. 4 (2) Jul-Dic 2011.

CADENA, G. MOMTAHAN O., ADIBI A. “Simple and efficient software-based stabilized holographic recording system”.Optical Engineering Vol 45 No 12. 2006.

CESSATO, L. MENDES, G. And FEJLICH, J. “Stabilized holographic recording using The residual real-time effect in a positive photoresist.°pt. Lett.12, 982-983. 1987

CHUNG J., HUA M. “Three-dimensional holographic imaging”. D.R. VIJ, Editor. Kurukshetra University 2002.

CORKE M., JONES J., KERSEY A. “All single-mode fiber optic holographic system with active fringe stabilisation”.Journal of physics e-scientific instruments. Vol. 18. 3. Pp. 185-186. 1985.

FERNÁNDEZ, M. CUDNEY, R. Mesa holográfica estable a un costo mínimo. Revista Mexicana de Física Vol. 33. 4. 1988. Pp. 631-639. 1988

FREJLICH, J. CESSATO, L. And MENDES, G. “Analysis of an active stabilization system For a holographic setup.°appl. Opt. 27, pp. 1967-1976. 1988

Fundación Española para la Ciencia y la tecnología. Libro Blanco e-ciencia en España. Ed. FECYT. 2004.

GOODWIN, G., and PAYNE, R. “Dynamic system identification: Experiment design and data analysis. Academic Press 1977.

Grid (2006) [Http://www.ucrav.cl/ucrav2/](http://www.ucrav.cl/ucrav2/). Sitio oficial Grid de instrumental científico. Chile.

HECHT, E. Óptica Tercera Edición. Pearson.(1998)

HEILMANN, R., KONKOLA P., CHEN C. “Digital heterodyne interference fringe control system”. Journal of Vacuum Science Technology B 19, 2342. 2001.

JOHANSON L. Holographic diffraction gratings with asymmetric groove profiles. Applications of Holography and optical Data Processing, Proceedings of the International Conference on Holography and optical Data Processing, Jerusalem, August 23-26, 1976, Pergamon, New York 1976, p. 521. Ljung, L. 1999. System Identification Theory for the User. 2d ed. Prentice Hall.

MACQUIGG DR. Hologram fringe stabilization method. Applied Optics Vol. 16. 1977

MANDADO, E. ACEVEDO, J. FERNÁNDEZ C. Automatas programables y sistemas de automatización / PLC and Automation Systems. Marcombo, 2009.

MANOHAR K., DASGUPTA K., SURI B. “Dye laser wavelength stabilization: An active control by interferometric fringe detection”. Review of Scientific Instrument Vol. 58. 6. 1987.

MUHS, J., LEILABADY P., CORKE M. “Fiber-optic holography employing multiple beam fringe stabilization and object/reference beam intensity variability”. Applied Optics. Volume: 27. 17. Pp. 3723-3727. 1988.

MUÑOZ, G. GARCÍA C. Mesa Holográfica pasiva ultra-estable: Análisis de vibraciones. XXIII reunión anual de óptica. Departamento de Física, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. 2010.

National Instruments, 2004. System Identification toolkit User Manual.

NEUMANN, D. Improvement of recorded holographic fringes by feedback control. Appl. Opt 6, 1097 (1967) Nyquist, H. “Certain topics in telegraph transmission theory,” Trans. AIEE, volumen 47, páginas 617-644, abril de 1928.

OGATA, K. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto Segunda Edición. Pearson.

OGATA, K. (2010). Ingeniería de control moderna Quinta Edición. México: Pearson.

Ringrid. (2006) [Http://www.e-science.unam.mx/ringrid/ringrid.jsp](http://www.e-science.unam.mx/ringrid/ringrid.jsp) Sitio Oficial Proyecto ringrid. México.

SANTOS, J. NEWSON TP., JACKSON DA. “Electronic speckle-pattern interferometry using single-mode fibers and active fringe stabilization”. Optics letters Vol. 15. 10. Pp. 573-

575. 1990.

SOLTZ, D. “Fringe stabilization and depth monitoring during the holographic photoelectrochemical etching of n-inp(100) substrates”. Journal of vacuum science and technology. Vol 14. 1996.

Stabilock II®Active Fringe Stabilizer, OdnnerHolographics, Amherst, NH. <http://www.stabilock.com/stabilock.com/Welcome.html>

The Design Society. “Points to cover in a PDS”<http://www.bath.ac.uk/idmrc/themes/projects/delores/co-design-website/dpg/pds/pds5.htm>. 2011.

YOUNG, P., PRIAMBODO P., MALDONADO T. “Simple interferometric fringe stabilization by charge coupled device based feedback control”. Applied Optics Vol 45 No 19. Pp. 4563-4566. 2006.

A. Anexo: Práctica de laboratorio y manual de usuario de la plataforma

A continuación se presenta un manual de usuario que tiene como objetivo familiarizar a un experimentador, remoto o presencial, con la plataforma creada como Sistema de Estabilización de Franjas Interferométricas (SEFI), y permitirle al experimentador realizar una evaluación de desempeño del sistema implementado. El manual comienza en la sección a.1 con una descripción general del interferómetro sobre el que se trabajará por medio de la plataforma y su instrumentación. El apartado a.2 muestra la forma de acceder y poner en funcionamiento la plataforma. La sección a.3 explica la forma de leer algunos indicadores en la interface de usuario, así como la a.4 las configuraciones que permiten modificación en la plataforma por parte del usuario. Finalmente, las secciones a.5 y a.6 muestran la forma de ingresar perturbaciones al sistema y ajustar el sistema de control, respectivamente.

A.1. Descripción general del interferómetro

El sistema de estabilización de franjas se implementó sobre un interferómetro Mach-Zehnder como el de la figura a.1. En los espejos E1 y E2 se ubicaron sendos actuadores piezoeléctricos para mover los espejos y cambiar de manera independiente la longitud de camino óptico en cada brazo, en uno para introducir perturbaciones al sistema y en otro para compensarlas.

Del cubo divisor de haz C2 emergen, en dos direcciones mutuamente perpendiculares, dos parejas de haces que interfieren para formar sendos patrones de franjas; una pareja de haces se dirige hacia una cámara CCD lineal, que captura un perfil de las intensidades del patrón y cuyos datos se muestran en la interface de usuario; y otra pareja de haces se dirige hacia una pantalla que puede verse por medio de una cámara IP montada en el lugar donde está ubicado el interferómetro. Para amplificar este sistema de franjas y facilitar su observación se utiliza un objetivo de microscopio.

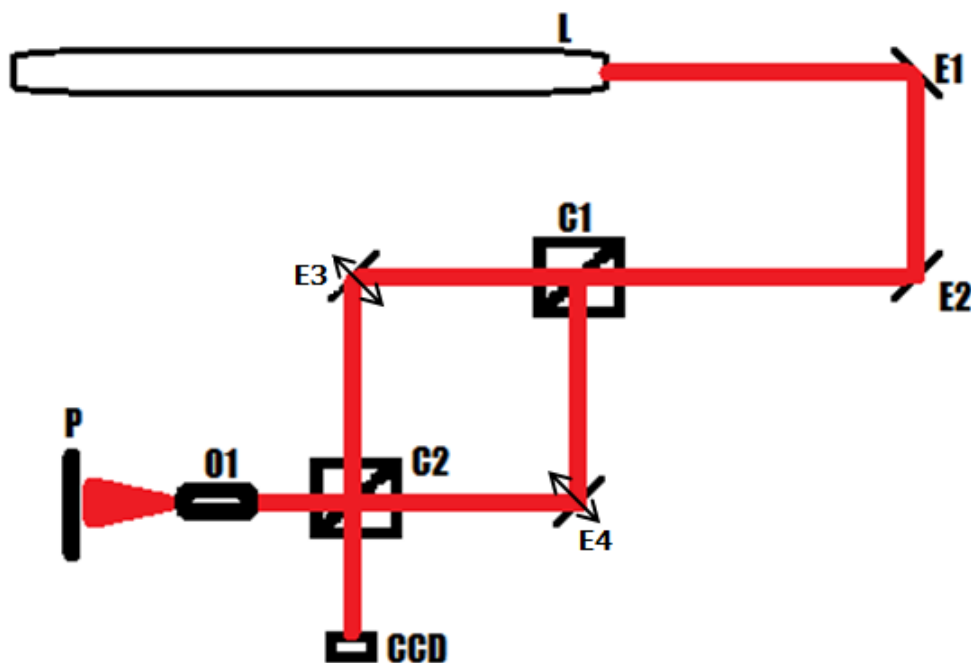


Figura A-1.: Interferómetro Mach-Zehnder

A.2. ¿Cómo acceder a la plataforma?

Antes de ingresar a la plataforma se debe realizar una reserva por correo electrónico a alguno de los administradores del experimento: Luciano Ángel (langel@eafit.edu.co) o Javier Espitia (jespitia@eafit.edu.co). Para tener una plataforma funcional, se debe instalar el labVIEW Runtime Engine, que se puede descargar de <http://joule.ni.com/nidu/cds/view/p/id/3433/lang/es>. Luego de recibir respuesta en cuanto a la disponibilidad de horarios, debe acceder al laboratorio de estabilización de franjas a la hora reservada usando Internet Explorer™, usando la dirección weblab.dis.eafit.edu.co. A continuación el sistema desplegará en la pantalla la Interfase de usuario de la plataforma, cuyo aspecto es el que se muestra en la figura a.2.

En labVIEW™ los archivos creados se llaman instrumentos virtuales, ya que, así como se percibe en la figura a.2, su apariencia es similar a la de un instrumento físico de laboratorio con botones de control e indicadores de visualización. La ejecución del instrumento virtual se realiza por medio de los botones de control que se encuentran en la parte superior izquierda de la ventana de la interface. Estos botones, que se muestran en la figura a.3, se describen a continuación:

El primer botón ejecuta el instrumento virtual. El segundo ejecuta repetidamente y de manera indefinida el algoritmo, esto es, ejecuta y al terminar la ejecución vuelve a ejecutar, y

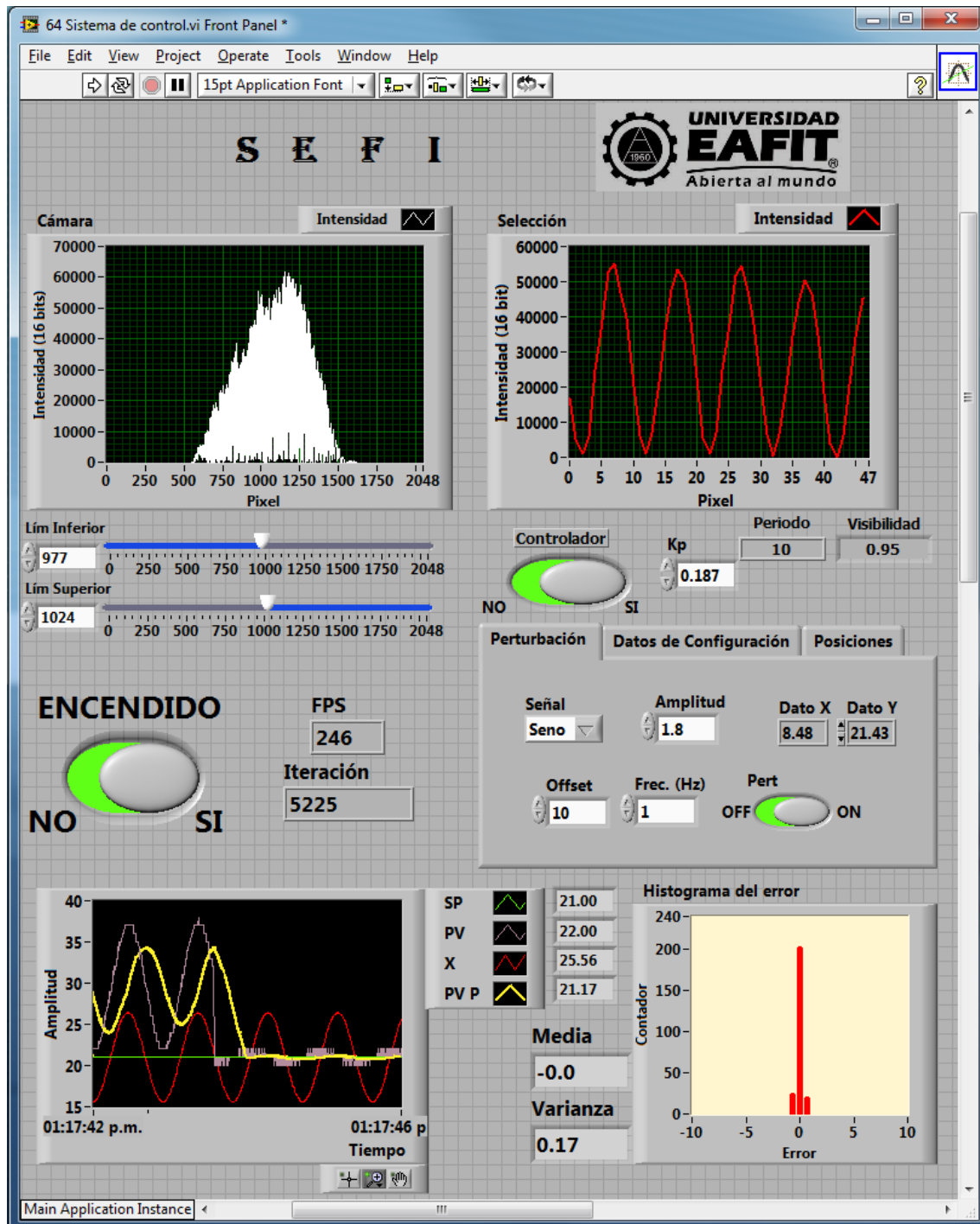


Figura A-2.: Interface de usuario de la plataforma



Figura A-3.: Botones de control de ejecución

este ciclo lo repite de manera indefinida. En esta plataforma no se usa. El tercero aborta la ejecución y no es necesario usarlo, ya que para detener el algoritmo hay un botón que cumple tal función como se verá más adelante ¹. El cuarto botón pausa la ejecución del algoritmo.

A.3. Observaciones iniciales

Al ejecutar por primera vez el algoritmo se pueden observar algunos indicadores que despliegan información sobre el interferómetro. En la parte superior de la pantalla se observan dos gráficos llamados *Cámara* y *Selección*. En el primero se observa la intensidad medida en cada uno de los 2048 pixeles de la cámara, y en el segundo se observa una ampliación de la región del patrón que es de interés para el experimento. Esta región puede escogerse por medio de los “Sliders” Lím inferior y Lím superior que por defecto están deshabilitados. Más adelante en este texto se mostrará como habilitarlos. Algunas variables que pueden observarse inicialmente se encuentran debajo del indicador “Selección”. Estos son el periodo de las franjas, cuyo cálculo se realiza por medio de la diferencia de las posiciones de dos mínimos consecutivos, y la visibilidad del patrón, la cual se calcula por medio de la expresión A.1, donde las \overline{I}_{min} e \overline{I}_{max} son los promedios temporales de las intensidades en las posiciones de un mínimo y un máximo consecutivo del patrón. Este promedio se realiza aproximadamente cada segundo.

$$\vartheta = \frac{\overline{I}_{max} - \overline{I}_{min}}{\overline{I}_{max} + \overline{I}_{min}} \quad (A-1)$$

Cuando no hay perturbación, la visibilidad es un valor muy cercano a la unidad; y decae cuando hay perturbaciones (como se explicará más adelante). Cuando las perturbaciones son muy importantes, la visibilidad se hace cero y las franjas ya no pueden verse. En este caso se observa un fondo iluminado uniforme. Debajo de los Sliders se encuentra el botón de encendido, el cual debe estar en la opción *SÍ* al ejecutar el algoritmo, para iniciar la captura de la cámara y el procesamiento de los datos. Por medio de este botón se detiene de manera natural la ejecución del algoritmo cuando se quiera cerrar la plataforma. Al lado del botón de encendido se encuentra el medidor de la tasa de muestreo y el contador de la iteración. La tasa de muestreo es la velocidad en cuentas por segundo con la que se están leyendo los datos de la cámara, procesando los datos y enviando la señal de control cuando está activo el

¹Detener el algoritmo por medio del botón “abortar” detiene de manera abrupta la captura de la cámara sin cerrar sesión. Lo que conducirá a que la cámara tenga que ser reiniciada por un administrador para poder ser usada de nuevo.

controlador. Bajo el botón de encendido se encuentra el indicador de variables que muestra el setpoint (SP), la posición del patrón (PV), la señal de perturbación (X) y la señal promedio de la posición del patrón (PV P) en tiempo real. A la derecha de este indicador se muestra el histograma de los últimos 240 datos del error, con el valor de su media y la varianza.

A.4. Configuraciones iniciales

En la parte central derecha del panel frontal se muestra un contenedor con tres pestañas; la primera para ajustar la señal de perturbación (nos ocuparemos de ella en el apartado A.5); la segunda, como se muestra en la figura A.4 para realizar algunas configuraciones, y la tercera (figura a.5) para observar las posiciones exactas de cada uno de los máximos y los mínimos del patrón.

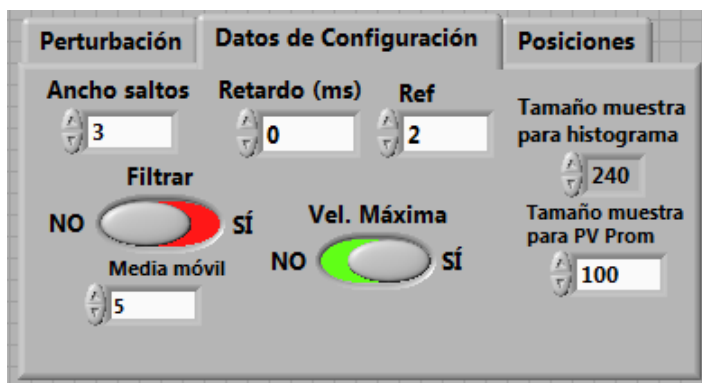


Figura A-4.: Configuraciones de la plataforma

En la pestaña de “Configuración” nos centraremos primero en el botón “Vel. Máxima”, el cual habilita los sliders de selección. Al escoger “No”, se pueden mover los sliders y escoger una región distinta del patrón observado mediante la cámara, región que se amplifica y es mostrada en el indicador “Selección”. Esta región es a su vez usada para los cálculos sucesivos, en particular porque el valor que tenga “Lím. Inferior” será el pixel número 1 a partir del cual se contarán las posiciones de todos los máximos y los mínimos del patrón. También, la posición del segundo mínimo será el setpoint para el sistema de control. Se sugiere escoger para el procesamiento de los datos una región del patrón cercana a la zona central donde las intensidades de los máximos de interferencia consecutivos tienen un valor similar. Para seguir con la configuración del sistema, se debe volver a la pestaña de configuración y asigne el selector de velocidad máxima a “Sí”. Luego de realizar un cambio en la zona del patrón que se quiere procesar, el algoritmo debe reajustar el tamaño del vector sobre el que detecta los máximos y los mínimos, por lo que se hace necesario reiniciar el programa. Para hacerlo, se

debe presionar dos veces el botón de encendido e iniciar de nuevo el programa con el primer botón de control de la figura a.3. En la región del patrón escogida, el algoritmo detecta las posiciones de los máximos y los mínimos de intensidad. Las posiciones de estos máximos y mínimos pueden visualizarse en la pestaña de “Posiciones”. Tanto para los máximos como para los mínimos se muestran dos columnas; la primera con la posición en pixeles donde se encuentra cada extremo relativo y la segunda, con el valor de intensidad (de 0 a 65535) asociado a ese extremo relativo, como se observa en la figura A.5, en la que se ilustra la pestaña “Posiciones”. Para la localización de los máximos y mínimos se utiliza el control “Ancho saltos”, el cual es el tamaño del salto en pixeles que se usa para localizar los valores extremos del patrón que se detectan cada vez que hay un cambio en el signo de la pendiente de la curva. El algoritmo diseñado no encontrará mínimos que estén separados por un valor menor al establecido mediante este control; y esto evita que picos asociados con el ruido sean identificados como máximos del patrón de interferencia; claro está, si este valor es demasiado grande, el algoritmo no encontrará ningún mínimo.



Figura A-5.: Pestaña de posiciones

La separación entre mínimos o máximos consecutivos se corresponde con el indicador de periodo que se encuentra debajo del indicador “Selección”. Se pueden cambiar otros parámetros en la pestaña configuración. Con el selector “Filtrar” se activa un filtro mediana supresor de ruido en el que el control “media móvil” le indica al algoritmo sobre cuantos valores alrededor de cada pixel hará el promedio de las intensidades. Con el control “Retardo” se cambia el periodo de muestreo de la cámara, que por defecto es de alrededor de 4 ms; asignarle un valor más alto de 4 ms hace que la cámara reduzca la frecuencia de muestreo. Para detectar la posición del patrón, el software escoge el mínimo del patrón dado por el control “Ref” que por defecto es 2. Esto quiere decir que la posición del segundo mínimo será asociada con la posición del patrón, y en todo el algoritmo ésta es la PV o variable procesada. En la primera iteración el valor de la PV se toma como setpoint (SP).

Finalmente, a la derecha de esta ventana de “Configuración” se encuentra el control llamado “Tamaño de muestras para histograma”, el cual configura el tamaño del vector usado para

llenar los últimos valores, tanto del error para dibujar el histograma y calcular la media y la varianza, como para los valores de intensidades máximas y mínimas en el cálculo de la visibilidad. El valor de “Tamaño de muestra para PV Prom” hace lo propio para la señal amarilla (promedio de la señal PV) que se ve en el indicador de variables; el cálculo de este promedio se hace con una cantidad de muestras dada por este control.

A.5. Perturbación

En la pestaña “Perturbación”, que se muestra en el figura a.6, se puede configurar la perturbación que se le ingresa al sistema por medio del actuador perturbador, y asignar u observar el valor de voltaje que se está enviando al actuador compensador por medio del control “Dato Y”.

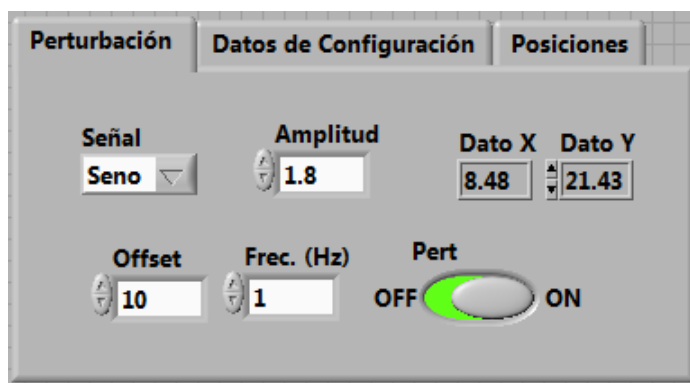


Figura A-6.: Configuración de la perturbación

En primer lugar, centrémonos en el control que permite asignar el voltaje al actuador compensador, ya que es interesante conocer la relación que existe entre el voltaje que se le ingresa al actuador y el movimiento que este produce en pixeles. Esta relación es fácil obtenerla por medio de la asignación de voltajes en este control y la lectura de la posición del patrón en el indicador PV (Señal morada en el indicador de variables de la figura A.2).

Las flechas de aumento (disminución) del voltaje enviado al actuador compensador (Dato Y), permiten aumentar (disminuir) el voltaje enviado al actuador, hasta producir un desplazamiento dado del patrón de interferencia. El valor del voltaje requerido para producir un desplazamiento de un período en el patrón de franjas, esto es, aquel que hace que la PV cambie en el número de pixeles de un período, es muy importante para diseñar un buen controlador, tal como se explica más adelante.

El control *Pert* activa la perturbación oscilatoria con un perfil dado por el control “Señal”, y con valores de frecuencia, amplitud y offset dados por los controles respectivos. Se debe

tener en cuenta que los valores dados por *Offset* y *Amplitud* están dados en voltios y no en pixeles como se perciben en las gráficas.

Puede observarse que la visibilidad del patrón de franjas cambia cuando se modifica el tipo de perturbación, y la amplitud y frecuencia de la misma. Asimismo, puede notarse el efecto de estos cambios sobre las características del histograma del error (SP-PV) y la varianza respectiva. El valor medio del error idealmente debería ser cero.

Con un valor de frecuencia de la perturbación constante, observe la variación del valor de visibilidad y varianza a medida que aumenta la amplitud de la perturbación. Deténgase cuando la amplitud en voltios de la perturbación corresponda con un desfase de amplitud de medio periodo espacial de las franjas, en este punto la visibilidad medida debe llegar a cero.

A.6. Controlador

Se ha implementado un controlador proporcional, al cual puede asignársele una constante proporcional por medio del control " K_p ". El sistema implementado mide la señal de error, esto es, la diferencia entre el setpoint y la variable procesada y multiplica este valor por la constante proporcional " K_p " para realizar esa variación en el voltaje que se le asigna al actuador compensador. De esta forma, si se ha medido el valor en que debe cambiar el voltaje para mover al patrón un periodo completo (ver sección A.5), se puede calcular una adecuada constante proporcional dividiendo el valor del periodo entre el valor medido. Luego de asignar al control " K_p " su valor adecuado, se puede ingresar al sistema una perturbación con una amplitud en pixeles y una frecuencia en Hz cuyo producto no supere los 10 pix·Hz, y activar el controlador para observar el efecto del sistema de control. Con una amplitud de la perturbación constante, puede realizarse una tabla de Visibilidad y Varianza Vs frecuencia de la perturbación. Las gráficas de Visibilidad Vs Frecuencia, y Varianza Vs Frecuencia pueden ajustarse a una tendencia cuadrática entre las variables, inversa y directa, respectivamente. Similarmente, fijando ahora la frecuencia, puede variarse la amplitud y graficar de nuevo la Visibilidad y la Varianza en función de la Amplitud, para observar un comportamiento similar.

B. Anexo: Especificaciones de los dispositivos empleados

B.1. Cámara CCD LC 100 de Thorlabs

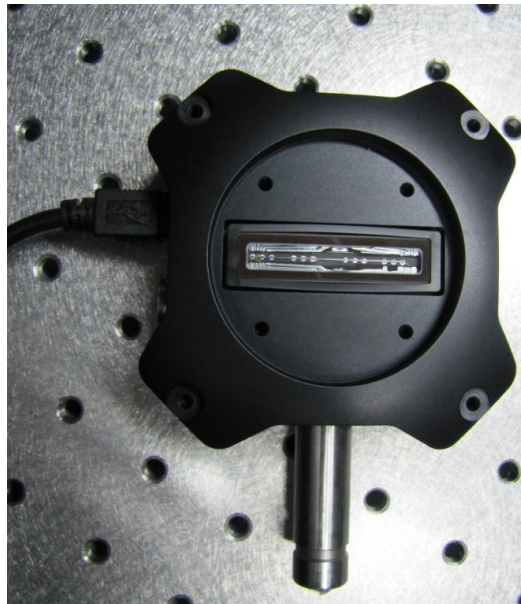


Figura B-1.: Cámara LC100

Sensor Specification	Dato
Detector Range (CCD Chip)	350 - 1100 nm
CCD Pixel Size	14 μ m x 56 μ m (14 μ m pitch)
CCD Sensitivity	240 V/(lx·s)
CCD Dynamic Range	333
CCD Pixel Number	2048
Integration time	1.054 ms - 50 s
Scan Rate Internal Trigger	Max 900 scans/s
S/N Ratio	\leq 2000:1
External trigger	Dato
Trigger Input	BNC
Trigger Signal	TTL 5 V and 3.3 V
Trigger Frequency, Scan Rate	Max 450 Hz, 450 Scans/s
Trigger Pulse Lenth	Min 50 ns
Trigger delay	4.5 μ s
Number of GPIOs	5
GPIO type	3.3 V TTL
Region of interest	16
Analog Output	Programmable 0 - 4V
General Specs	Dato
Interface	Hi-Speed USB2.0 (480 Mbit/s)
Dimensions(L x W x H)	80 mm x 80 mm x 33 mm
Weight	\leq 0.4 kg

B.2. Driver de actuadores MDT693A de Thorlabs



Figura B-2.: Driver

Input/Output Specification	Valor
Ext. Input Voltaje Range	0 - 10 V
Ext. Input Impedance	10 K Ω
Output Voltaje Range Pos 1	0 - 75 V
Max Output Current	60 mA
Output Impedance	150 Ω , 0.047 μ F
EXT Input Gain Pos 1	7.5 V/V
D/A Resolution	16-bit
Voltaje Resolution	2.75 mV
Communication Port	RS232

B.3. Actuador Piezo-Eléctrico PAS005 de Thorlabs

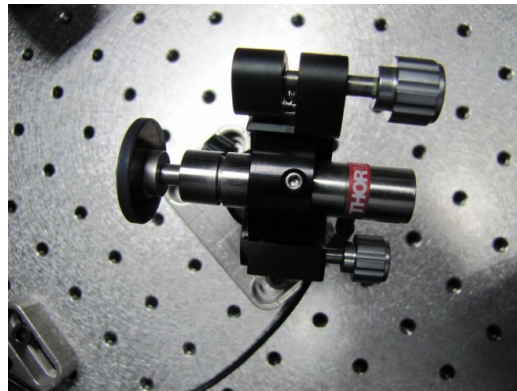


Figura B-3.: Actuador PAS005

Parámetro	Valor
Travel	20 μ m
Length	57 mm
Resolution	20 nm
Capacitance	3.6 μ F
Piezo Blocking Force	1150 N at 75 V
Operating Temp	-20 to 80 $^{\circ}$ C
Piezo Input Voltage	0 to 75 V
Included cables	SMC Female, 3m
Recommended Controllers	BPC301, MDT693A, MPZ601, TPZ001